El tejido del cosmos



Brian Greene

Sabemos que espacio y tiempo forman el tejido mismo del cosmos, pero ambos conceptos siguen estando llenos de misterio. ¿Podría existir el universo sin espacio ni tiempo? ¿Podemos viajar al pasado? Brian Greene nos propone un viaje de descubrimiento hacia nuevos tesoros del conocimiento que la física moderna ha descubierto bajo la superficie de nuestro mundo cotidiano y que nos hará mirar la realidad de un modo completamente distinto.

Brian Greene

El tejido del cosmos

Espacio, tiempo y la textura de la realidad

Título original: *The Fabric of the Cosmos. Space, Time and the Texture of Reality*
Brian Greene, 2000
Traducción: Javier García Sanz
Retoque de cubierta: et.al

Editor digital: Piolin
ePub base r2.1



Índice de contenido

Para Tracy

Prefacio

Espacio y tiempo atrapan la imaginación como ningún otro tema científico. Y hay una buena razón para ello. Ambos constituyen la arena de la realidad, el propio tejido del cosmos. Toda nuestra existencia —todo lo que hacemos, pensamos y sentimos— tiene lugar en alguna región del espacio durante algún intervalo de tiempo. Pese a todo, la ciencia sigue luchando por entender qué son realmente el espacio y el tiempo. ¿Son entidades físicas reales o son simplemente ideas útiles? Si son reales, ¿son fundamentales o emergen de constituyentes más básicos? ¿Qué significa que el espacio esté vacío? ¿Tiene el tiempo un comienzo? ¿Hay una flecha, que fluye inexorablemente del pasado al futuro, como parece indicar la experiencia común? ¿Podemos manipular espacio y tiempo? En este libro seguimos trescientos años de investigación apasionada en busca de respuestas, o al menos conatos de respuestas, a estas cuestiones básicas pero profundas sobre la naturaleza del universo.

Nuestro viaje también nos lleva repetidamente a otra pregunta íntimamente relacionada, tan general como escurridiza: ¿qué es la realidad? Nosotros los seres humanos sólo tenemos acceso a las experiencias interiores de percepción y pensamiento, así que ¿cómo podemos estar seguros de que verdaderamente reflejan un mundo externo? Este es un problema que los filósofos conocen

desde hace tiempo. Los cineastas lo han popularizado en argumentos que incluyen mundos artificiales, generados por estimulación neurológica muy precisa, que existen solamente dentro de las mentes de sus protagonistas. Y los físicos, entre los que me incluyo, son agudamente conscientes de que la realidad que observamos —la materia que evoluciona en el escenario del espacio y el tiempo— puede tener poco que ver con la realidad que hay fuera, si es que la hay. De todas formas, puesto que las observaciones son todo lo que tenemos, las tomamos en serio. Escogemos como guías los datos duros y el armazón de las matemáticas, no una imaginación desbordada ni un escepticismo recalcitrante, y buscamos las teorías más simples pero más amplias capaces de explicar y predecir el resultado de los experimentos actuales y futuros. Esto restringe severamente las teorías que perseguimos. (En este libro, por ejemplo, no vamos a encontrar ningún indicio de que yo esté flotando en un tanque, conectado a miles de cables de estimulación cerebral que me hacen pensar que ahora escribo este texto.) Pero durante los últimos cien años, descubrimientos en física han sugerido revisiones en nuestro sentido cotidiano de la realidad que son tan espectaculares como asombrosas, y tan destructoras de paradigmas como la ciencia ficción más imaginativa. Estos cambios revolucionarios enmarcarán nuestro paso por las páginas que siguen.

Muchas de las cuestiones que exploramos son las mismas que, con disfraces diversos, preocuparon a Aristóteles, Galileo, Newton, Einstein y muchos otros a lo largo de las épocas. Y puesto que este libro trata de transmitir la ciencia que se está haciendo, seguimos estas cuestiones tal como han sido respondidas por una generación, cambiadas por sus sucesores, y refinadas y

reinterpretadas por los científicos en los siglos que siguieron.

Por ejemplo, sobre la enigmática cuestión de si el espacio completamente vacío es, como un lienzo en blanco, una entidad real o meramente una idea abstracta, seguimos el péndulo de la opinión científica a medida que oscila entre la declaración de Isaac Newton en el siglo XVII *de que el espacio es real, la conclusión de Ernst Mach en el siglo* XIX *de que no lo es, y la espectacular reformulación de Einstein en el siglo* XX *de la propia cuestión, en la que él fusionó espacio y tiempo y básicamente refutó a Mach. Luego encontramos descubrimientos posteriores que transformaron la cuestión una vez más redefiniendo el significado de «vacío», imaginando que el espacio está inevitablemente lleno de lo que se denominan campos cuánticos y posiblemente una difusa energía uniforme llamada constante cosmológica —ecos modernos de la vieja y desacreditada idea de un éter que llena el espacio—. Y lo que es más, luego describimos cómo algunos experimentos espaciales venideros pueden confirmar aspectos particulares de las conclusiones de Mach que resultan estar de acuerdo con la relatividad general de Einstein, lo que ilustra muy bien la madeja fascinante y enmarañada del desarrollo científico.*

En nuestra propia era encontramos intuiciones gratificantes de la cosmología inflacionaria en la flecha del tiempo, el rico surtido de dimensiones espaciales extras de la teoría de cuerdas, la radical sugerencia de la teoría M según la cual el espacio en el que habitamos puede ser sólo una tabla flotando en un cosmos más grande, y la actual especulación desbocada de que el universo que vemos puede ser no otra cosa que un holograma cósmico. Aún no sabemos si las más recientes de estas propuestas teóricas son correctas. Pero por escandalosas que suenen, las

investigamos meticulosamente porque a ellas nos conduce nuestra búsqueda de las leyes más profundas del universo. Una realidad extraña y poco familiar puede aparecer no sólo de la fértil imaginación de la ciencia ficción, sino que también puede emerger del filo de la navaja de la física moderna.

El tejido del cosmos está dirigido principalmente al lector general que tiene poca o ninguna formación en ciencias pero cuyo deseo de comprender el funcionamiento del universo es un incentivo para luchar con varios conceptos complejos y desafiantes. Como hice en mi primer libro, El universo elegante*, he permanecido cerca de las ideas científicas, aunque prescindiendo de los detalles matemáticos en favor de metáforas, analogías, historias e ilustraciones. Cuando llegamos a las secciones más difíciles del libro, advierto al lector y doy breves resúmenes para quienes decidan saltarse o pasar deprisa por estas discusiones más complicadas. De este modo, el lector debería ser capaz de seguir el camino del descubrimiento y obtener no sólo un conocimiento de la visión del mundo de la física actual, sino una comprensión de cómo y por qué esta visión del mundo ha ganado aceptación.*

Los estudiantes, los lectores ávidos de ciencia a un nivel general, los profesores y los profesionales también deberían encontrar muchas cosas interesantes en el libro. Aunque los capítulos iniciales cubren el material básico necesario pero estándar en relatividad y en mecánica cuántica, su énfasis en la corporeidad del espacio y el tiempo es un enfoque poco convencional. Los capítulos posteriores cubren un amplio abanico de temas —el teorema de Bell, los experimentos de elección diferida, la medida cuántica, la expansión acelerada, la posibilidad de producir agujeros negros en la próxima generación de aceleradores de partículas, las fantásticas máquinas de tiempo en agujeros

de gusano, por citar unos pocos— y de este modo pondrán al día a dichos lectores sobre varios de los avances más sorprendentes y debatidos.

Parte del material que cubro es controvertido. Cuando se trata de cuestiones que están en el aire, he discutido los puntos de vista dominantes en el texto principal. En el caso de los puntos de discusión en los que creo que se ha llegado a un consenso, he relegado a las notas los puntos de vista diferentes. Algunos científicos, especialmente quienes sostienen puntos de vista minoritarios, quizá se opongan a algunos de mis juicios, pero a través del texto principal y las notas he intentado un tratamiento equilibrado. En las notas, el lector particularmente diligente encontrará también explicaciones más completas, clarificaciones y reservas que son relevantes para puntos que he simplificado, así como (para quienes tengan esta inclinación) breves contrapartidas matemáticas para el enfoque libre de ecuaciones adoptado en el texto principal. Un breve glosario proporciona una referencia rápida para algunos de los términos científicos más especializados.

Ni siquiera un libro de esta longitud puede agotar el vasto tema del espacio y el tiempo. Yo me he centrado en aquellos aspectos que encuentro a la vez excitantes y esenciales para formar una imagen completa de la realidad que pinta la ciencia moderna. Sin duda, muchas de estas elecciones reflejan un gusto personal, y por ello pido perdón a quienes sienten que su propio trabajo o su área de estudio favorita no recibe la atención adecuada.

Mientras escribía El tejido del cosmos *he tenido la fortuna de recibir una valiosa realimentación de varios lectores devotos. Raphael Kasper, Lubos Motl, David Steinhart y Ken Vineberg leyeron diversas versiones del manuscrito entero, a veces deforma repetida, y ofrecieron sugerencias numerosas, detalladas y perspicaces que*

ampliaron sustancialmente la claridad y la exactitud de la presentación. Se lo agradezco calurosamente. David Albert, Ted Baltz, Nicholas Boles, Tracy Day, Peter Demchuk, Richard Easther, Anna Hall, Keith Goldsmith, Shelley Goldstein, Michael Gordin, Joshua Greene, Arthur Greenspoon,, Gavin Guerra, Sandra Kauffman, Edward Kastenmeier, Robert Krulwich, Andrei Linde, Shani Offen,, Maulik Parikh, Michael Popowits, Marlin Scully, John Stachel y Lars Straeter leyeron todo o parte del manuscrito, y sus comentarios fueron extraordinariamente útiles. Me beneficié de conversaciones con Andreas Albrecht, Michael Basset, Sean Carrol, Andrea Cross, Rita Greene, Wendy Green, Susan Greene, Alan Guth,, Mark Jackson, Daniel Kabat, Will Kinney, Justin Khoury, Hiranya Peiris, Saúl Perlmutter, Koenraad Schalm, Paul Steinhardt, Leonard Susskind, Neil Turok, Henry Tye, William War-mus y Erick Weinberg. Debo una gratitud especial a Raphael Gunner, cuyo agudo sentido del argumento genuino y su disposición a criticar varios de mis intentos fueron de valor incalculable. Eric Martínez ofreció una asistencia crítica e incansable en la fase de producción del libro, y Jason Severs hizo un trabajo estelar en la creación de las ilustraciones. Doy las gracias a mis agentes, Katinka Matson y John Brockman. Y tengo una gran deuda de gratitud con mi editor, Marty Asher, por ofrecerme un manantial de ánimo, consejo e intuición que mejoraron sustancialmente la calidad de la presentación.

En el curso de mi carrera, mi investigación científica ha sido financiada por el Departamento de Energía, la National Science Foundation y la Alfred P Sloan Foundation. Reconozco y agradezco su apoyo.

PRIMERA PARTE

La realidad de la arena

— 1 —

Caminos a la realidad

El espacio, el tiempo y por qué las cosas son como son

Ninguno de los libros de la vieja y polvorienta librería de mi padre estaba prohibido. Pese a todo, cuando yo era pequeño nunca vi a nadie coger uno. La mayoría de ellos eran gruesos volúmenes —una historia general de la civilización, volúmenes a juego de grandes obras de la literatura occidental, muchos otros que ya no puedo recordar— que parecían casi fundidos con las estanterías que se combaban ligeramente tras décadas de tenaz soporte. Pero en la balda más alta había un pequeño libro que, de vez en cuando, captaba mi atención porque parecía tan fuera de lugar como Gulliver entre los Brobdingnagianos. Visto en retrospectiva, no estoy muy seguro de por qué esperé tanto antes de echarle una mirada. Quizá, a medida que pasaban los años, los libros se parecían menos al material que uno lee y más a las reliquias familiares que uno admira de lejos. Finalmente, esa reverencia dejó paso a la arrogancia de la adolescencia. Tomé el pequeño libro, le quité el polvo y lo abrí por la primera página. Las primeras líneas eran, como mínimo, llamativas.

«Sólo hay un problema realmente filosófico, y es el del suicidio», empezaba el texto. Me sobrecogí. «Que el mundo tenga o no tres dimensiones o que haya nueve o doce categorías mentales», continuaba, «viene después»-; tales cuestiones, explicaba el texto, eran parte del juego al que jugaba la Humanidad, pero sólo merecían atención una vez que hubiese sido dirimida la cuestión verdadera. El libro era *El mito de Sísifo*, y estaba escrito por el filósofo de origen argelino y premio Nobel Albert Camus. Tras un momento de desconcierto, la gelidez de sus palabras se derritió a la luz de la comprensión. Sí, por supuesto, pensé. Uno puede sopesar esto o analizar aquello hasta que las ranas críen pelo, pero la cuestión real es si todas estas cavilaciones y análisis le convencen a uno de que la vida es digna de vivirse. A eso es a lo que se reduce todo. Todo lo demás son detalles.

Mi encuentro casual con el libro de Camus debe haber ocurrido durante una etapa particularmente impresionable porque sus palabras me han acompañado más que cualquier otra cosa que yo haya leído. Muchas veces he imaginado cómo responderían a la más importante de todas las cuestiones algunas personas a las que había conocido, o había oído hablar, o había visto en televisión. Visto en retrospectiva, sin embargo, fue su segunda afirmación —relativa al papel del progreso científico— la que para mí se mostró particularmente desafiante. Camus reconocía el valor de comprender la estructura del universo, pero por lo que yo podía entender, rechazaba la posibilidad de que dicha comprensión pudiese suponer la más mínima diferencia para nuestro juicio sobre el valor de la vida. Por supuesto, mi lectura adolescente de la filosofía existencial era tan sofisticada como la lectura que podría hacer Bart Simpson de la poesía romántica, pero incluso así, la conclusión de Camus me dejó bastante desconcertado. Para

este aspirante a físico, una valoración informada de la vida requeriría necesariamente una completa comprensión del escenario de la vida: el universo. Me recuerdo pensando en que si nuestra especie morara en refugios cavernosos enterrados en el subsuelo profundo y aún tuviera que descubrir la superficie de la Tierra, la brillante luz del Sol, una brisa oceánica y las estrellas que hay más allá, o si la evolución hubiese seguido un camino diferente y aún tuviéramos que adquirir todos los sentidos salvo el del tacto, de modo que todo lo que conociéramos viniera sólo de nuestras impresiones táctiles de nuestro entorno inmediato, o si las facultades mentales humanas dejaran de desarrollarse durante la primera infancia de modo que nuestras capacidades emocionales y analíticas nunca pasaran de las de un niño de cinco años —si nuestras experiencias sólo formaran un pálido retrato de la realidad— nuestra valoración de la vida estaría gravemente comprometida. Cuando finalmente encontrásemos nuestro camino a la superficie de la Tierra, o cuando finalmente alcanzásemos la capacidad de ver, oír, oler, y saborear, o cuando nuestras mentes quedaran finalmente libres para desarrollarse como lo hacen normalmente, nuestra visión colectiva de la vida y el cosmos cambiaría radicalmente. Nuestra comprensión de la realidad, antes muy restringida, arrojaría una luz muy diferente sobre la más fundamental de todas las cuestiones filosóficas.

Pero, podría usted preguntar, ¿qué pasa con ello? Por supuesto, cualquier juicio serio concluiría que aunque no podamos comprender todo sobre el universo —cada aspecto del comportamiento de la materia o de la función de la vida — somos conscientes de las grandes pinceladas que adornan el lienzo de la Naturaleza. Por supuesto, como sugería Camus, los progresos en física, tales como comprender el número de dimensiones espaciales; o los

progresos en neuropsicología, tales como comprender todas las estructuras organizativas del cerebro; o, para lo que nos importa, los progresos en cualquier otra empresa científica, pueden rellenar detalles importantes, pero su impacto sobre nuestra valoración de la vida y la realidad sería mínimo. Por supuesto, la realidad es lo que pensamos que es; la realidad se nos revela por nuestras experiencias.

En una u otra medida, esta visión de la realidad es la que muchos de nosotros mantenemos, aunque sólo sea de forma implícita. Ciertamente me encuentro a mí mismo pensando de esta manera en la vida cotidiana; es fácil quedar seducido por el rostro que la Naturaleza revela directamente a nuestros sentidos. Pese a todo, en las décadas transcurridas desde que tropecé por primera vez con el texto de Camus he aprendido que la ciencia moderna nos cuenta una historia muy diferente. La lección más importante que hemos sacado de la investigación científica durante el último siglo es que la experiencia humana es a menudo una guía equívoca a la verdadera naturaleza de la realidad. Apenas por encima de la superficie de lo cotidiano hay un mundo que apenas habíamos reconocido. Los seguidores de lo oculto, los devotos de la astrología y los que mantienen principios religiosos que hablan a una realidad más allá de la experiencia, han llegado hace tiempo, desde perspectivas muy variables, a una conclusión similar. Pero no es eso lo que yo tengo en mente. Yo me estoy refiriendo al trabajo de innovadores ingeniosos e investigadores incansables —los hombres y mujeres de ciencia— que han quitado capa tras capa de la cebolla cósmica, enigma a enigma, y han revelado un universo que es a un tiempo sorprendente, poco familiar, excitante, elegante y completamente diferente de lo que cualquiera esperara.

Estos desarrollos no son otra cosa que detalles. Los avances fundamentales en física han obligado, y siguen obligando, a revisiones drásticas de nuestra idea del cosmos. Sigo ahora tan convencido como lo estaba hace décadas de que Camus escogió correctamente el valor de la vida como la cuestión definitiva, pero las ideas de la física moderna me han persuadido de que valorar la vida a través de las lentes de la experiencia cotidiana es como mirar un Van Gogh a través de una botella de Coca-Cola vacía. La ciencia moderna ha sido punta de lanza en un asalto tras otro a la evidencia recogida por nuestras percepciones rudimentarias, mostrando que a menudo éstas dan una idea nebulosa del mundo en que vivimos. Y así, mientras Camus separaba las cuestiones físicas y las calificaba de secundarias, yo he llegado a convencerme de que son primarias. Para mí, la realidad física fija el escenario y al mismo tiempo proporciona la iluminación para tratar la cuestión de Camus. Valorar la existencia sin tener en cuenta las ideas de la física moderna sería como luchar en la oscuridad con un adversario desconocido. Al profundizar en nuestra comprensión de la verdadera naturaleza de la realidad física, reconfiguramos profundamente nuestro sentido de nosotros mismos y nuestra experiencia del universo.

El objetivo central de este libro es explicar algunas de las más destacadas revisiones en nuestra imagen de la realidad, centrando el foco en aquellas que afectan al proyecto a largo plazo de nuestra especie para entender el espacio y el tiempo. Desde Aristóteles a Einstein, desde el astrolabio al Telescopio Espacial Hubble, desde las pirámides a los observatorios en las cimas de las montañas, espacio y tiempo han enmarcado el pensamiento desde que el pensamiento empezó. Con la llegada de la era científica moderna, su importancia ha crecido. Durante los tres

últimos siglos los desarrollos en física han mostrado al espacio y al tiempo como los conceptos más desconcertantes y atractivos, y como los instrumentos más fundamentales en nuestro análisis científico del universo. Estos desarrollos han mostrado también que espacio y tiempo encabezan la lista de las construcciones científicas de épocas pasadas que están siendo fantásticamente revisadas por la investigación de vanguardia.

Para Isaac Newton, espacio y tiempo simplemente eran: constituían un escenario cósmico universal e inerte en el que se representaban los sucesos del universo. Para su contemporáneo y frecuente rival Gottfried Wilhelm Leibniz, «espacio» y «tiempo» eran meramente el vocabulario de las relaciones entre dónde estaban los objetos y cuándo tenían lugar los sucesos. Nada más. Pero para Albert Einstein, espacio y tiempo eran la materia prima subyacente a la realidad. Con sus teorías de la relatividad, Einstein cambió nuestro pensamiento sobre espacio y tiempo y mostró el papel principal que tenían en la evolución del universo. Desde entonces, espacio y tiempo han sido las joyas resplandecientes de la física. Son a un tiempo familiares y desconcertantes; entender completamente el espacio y el tiempo se ha convertido en el desafío más importante y el premio más buscado de la física.

Los desarrollos que cubriré en este libro entretejen de maneras diversas el tejido del espacio y el tiempo. Algunas ideas desafiarán aspectos del espacio y el tiempo tan básicos que durante siglos, si no milenios, han parecido incuestionables. Otras buscarán el vínculo entre nuestra comprensión teórica del espacio y el tiempo y las características que normalmente experimentamos. Y otros plantearán cuestiones incomprensibles dentro de los confines limitados de las percepciones ordinarias.

Hablaremos sólo mínimamente de filosofía (y nada en absoluto del suicidio y el significado de la vida). Pero no nos limitaremos en nuestra búsqueda científica por resolver los misterios del espacio y el tiempo. Desde la más pequeña mota de polvo y los primeros momentos del universo hasta sus más lejanos confines y más distante futuro, examinaremos el espacio y el tiempo en entornos familiares y lejanos, con una mirada permanente en busca de su verdadera naturaleza. Puesto que la historia del espacio y el tiempo está aún por escribirse completamente, no llegaremos a ninguna valoración final. Pero encontraremos una serie de desarrollos —algunos muy extraños, otros profundamente satisfactorios, algunos verificados experimentalmente, otros totalmente especulativos— que mostrarán cuán cerca hemos llegado a envolver con nuestras mentes la estructura del cosmos y tocar la verdadera textura de la realidad.

La realidad clásica

Los historiadores discrepan sobre cuándo comenzó exactamente la era científica moderna, pero ciertamente ya estaba en marcha y a buen paso en la época en que Galileo Galilei, Rene Descartes e Isaac Newton se habían expresado. En aquellos días se estaba forjando la nueva mente científica, a medida que las pautas encontradas en los datos terrestres y astronómicos dejaban cada vez más claro que hay un orden para todas las idas y venidas del cosmos, un orden accesible al razonamiento cuidadoso y el análisis matemático. Estos primeros pioneros del pensamiento científico moderno argumentaban que, cuando se examinan de la forma correcta, los sucesos en el universo son no sólo explicables sino también predecibles.

Se había revelado el poder de la ciencia para predecir aspectos del futuro de forma consistente y cuantitativa.

El estudio científico temprano se centraba en los tipos de cosas que uno podría ver o experimentar en la vida cotidiana. Galileo dejó caer pesos desde una torre inclinada (o así dice la leyenda) y observó bolas que rodaban por superficies inclinadas; Newton estudió manzanas que caían (o así dice la leyenda) y la órbita de la Luna. El objetivo de estas investigaciones era acostumbrar al oído científico naciente a las armonías de la Naturaleza. Por supuesto, la realidad física era la materia de la experiencia, pero el reto era oír la rima y la razón tras el ritmo y la regularidad. Muchos héroes cantados y no cantados contribuyeron al rápido e impresionante progreso, pero fue Newton quien se hizo con el espectáculo. Con un puñado de ecuaciones matemáticas sintetizó todo lo conocido sobre el movimiento en la Tierra y en los cielos, y al hacerlo compuso la partitura para lo que ha llegado a conocerse como *física clásica*.

En las décadas que siguieron a la obra de Newton, sus ecuaciones fueron desarrolladas en una elaborada estructura matemática que ampliaba de forma significativa su alcance y su utilidad práctica. La física clásica se convirtió poco a poco en una disciplina científica madura y sofisticada. Pero brillando claramente entre todos estos avances estaba el faro de las ideas originales de Newton. Incluso hoy, más de trescientos años después, uno puede ver las ecuaciones de Newton escritas en las pizarras de las clases de introducción a la física en todo el mundo, impresas en las trayectorias de las naves espaciales calculadas en los planes de vuelo de la NASA, e inmersas dentro de los cálculos complejos de la investigación de vanguardia. Newton incluyó una gran riqueza de fenómenos físicos dentro de una única herramienta teórica.

Pero mientras formulaba sus leyes de movimiento, Newton encontró un obstáculo crítico, un obstáculo que es de particular importancia para nuestra historia (capítulo 2). Todo el mundo sabía que las cosas podían moverse, pero ¿qué pasaba con el escenario en el que tenía lugar el movimiento? Bien, eso es el espacio, hubiéramos respondido todos. Pero, replicaba Newton, ¿qué es el espacio? ¿Es el espacio una entidad física real o es una idea abstracta nacida de la lucha humana por abarcar el cosmos? Newton comprendió que había que responder a esta pregunta clave, porque sin adoptar una postura sobre el significado de espacio y tiempo sus ecuaciones que describen el movimiento no tendrían sentido. La comprensión requiere contexto; la intuición debe estar anclada.

Y así, con unas pocas frases breves en sus *Principia Mathematica*, Newton articuló una idea del espacio y el tiempo, declarándolos entidades absolutas e inmutables que proporcionaban al universo un escenario rígido e invariable. Según Newton, espacio y tiempo proporcionaban un andamiaje invisible que daba forma y estructura al universo.

No todos estaban de acuerdo. Algunos argumentaban convincentemente que tenía poco sentido asignar existencia a algo que uno no puede sentir, captar o ser afectado por ello. Pero el poder explicatorio y predictivo de las ecuaciones newtonianas acallaba a los críticos. Durante los doscientos años siguientes, su concepto absoluto del espacio y el tiempo fue un dogma.

La realidad relativista

La visión del mundo newtoniana clásica era gratificante. No sólo describía los fenómenos naturales con sorprendente exactitud, sino que los detalles de la descripción —las matemáticas— estaban en buen acuerdo con la experiencia. Si usted empuja algo, lo acelera. Cuanto más fuerte golpea un balón, mayor es el impacto cuando éste choca con una pared. Si usted presiona algo, siente que eso le devuelve la presión. Cuanto más masivo es algo, más fuerte es su atracción gravitatoria. Éstas están entre las propiedades más básicas del mundo natural, y cuando uno aprende la herramienta de Newton, las ve representadas en sus ecuaciones, claras como la luz del día. A diferencia de los galimatías inescrutables de una bola de cristal, el funcionamiento de las leyes de Newton estaba a la vista para todos los que tuviesen una mínima formación matemática. La física clásica proporcionaba una base rigurosa para la intuición humana.

Newton había incluido la fuerza de gravedad en sus ecuaciones, pero hubo que esperar a la década de 1860 para que el científico escocés James Clerk Maxwell ampliara la herramienta de la física clásica para tener en cuenta fuerzas eléctricas y magnéticas. Para hacerlo, Maxwell necesitó ecuaciones adicionales y unas matemáticas cuya comprensión plena requería un mayor nivel de formación. Pero sus nuevas ecuaciones fueron tan satisfactorias para explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos como lo fueron las de Newton para la descripción del movimiento. A finales del siglo XIX era evidente que los secretos del universo no podían competir con el poder del intelecto humano.

De hecho, con la incorporación satisfactoria de la electricidad y el magnetismo hubo una sensación creciente de que la física teórica pronto estaría completa. La física, sugerían algunos, iba a convertirse rápidamente en una

disciplina acabada y sus leyes pronto estarían grabadas en piedra. En 1894, el reputado físico experimental Albert Michelson comentaba que «la mayoría de los grandes principios subyacentes han sido firmemente establecidos» y citaba a un «eminente científico» —muchos creen que era el físico británico lord Kelvin— que afirmaba que todo lo que quedaba por hacer era completar detalles en la determinación de algunos números con un mayor número de cifras decimales. [1.1] En 1900, el propio Kelvin señaló que «dos nubes» se cernían sobre el horizonte: una tenía que ver con las propiedades del movimiento de la luz y la otra con aspectos de la radiación que emiten los objetos cuando se calientan. [1.2] Pero la sensación general era que se trataba de meros detalles que, sin duda, pronto serían abordados.

En menos de una década, todo cambió. Como se había previsto, los dos problemas que Kelvin había planteado fueron rápidamente abordados, pero no eran en absoluto menores. Cada uno de ellos inició una revolución, y cada uno de ellos exigió una reescritura fundamental de las leyes de la Naturaleza. Los conceptos clásicos de espacio, tiempo y realidad —los que durante cientos de años no sólo habían funcionado, sino que también habían expresado de forma concisa nuestra sensación intuitiva del mundo— fueron derrocados.

La revolución de la relatividad, que abordaba la primera de las «nubes» de Kelvin, data de 1905 y 1915, cuando Albert Einstein completó sus teorías de la relatividad especial y general (capítulo 3). Mientras luchaba con enigmas que implicaban a la electricidad, el magnetismo y el movimiento de la luz, Einstein se dio cuenta de que la idea de Newton de espacio y tiempo, la piedra angular de la física clásica, era errónea. En el curso de unas intensas semanas en la primavera de 1905 él determinó que el

espacio y el tiempo no son independientes y absolutos, como Newton había pensado, sino que están mezclados de una forma que contradice la experiencia común. Unos diez años más tarde, Einstein clavó un último clavo en el ataúd newtoniano al reescribir las leyes de la física gravitatoria. Esta vez, Einstein no sólo demostró que espacio y tiempo son parte de un todo unificado, sino que también demostró que deformándose y curvándose participan en la evolución cósmica. Lejos de ser las estructuras rígidas e inmutables imaginadas por Newton, espacio y tiempo son, en la reformulación de Einstein, flexibles y dinámicos.

Las dos teorías de la relatividad están entre los logros más preciosos de la Humanidad, y con ellos Einstein derribó la idea de Newton de la realidad. Aunque la física newtoniana parecía captar matemáticamente mucho de lo que experimentamos físicamente, la realidad que describe no es la realidad de nuestro mundo. La nuestra es una realidad relativista. Pero, debido a que la desviación entre la realidad clásica y la relativista sólo se manifiesta en condiciones extremas (como extremos de velocidad y gravedad), la física newtoniana sigue proporcionando una aproximación que se muestra extraordinariamente precisa y útil en muchas circunstancias. Pero utilidad y realidad son valores muy diferentes. Como veremos, aspectos del espacio y tiempo que para muchos de nosotros son una segunda naturaleza han resultado ser productos de una perspectiva newtoniana falsa.

La realidad cuántica

La segunda anomalía a la que se refería lord Kelvin llevó a la revolución cuántica, una de las grandes convulsiones a la que se ha visto sometido el conocimiento humano moderno.

Cuando se apagaron los fuegos y se disipó el humo, el barniz de la física clásica aparecía chamuscado en el marco recién emergente de la realidad cuántica.

Una característica central de la física clásica es que si usted conoce las posiciones y velocidades de todos los objetos en un instante particular, las ecuaciones de Newton, junto con su puesta al día maxwelliana, pueden decirle cuáles serán sus posiciones y velocidades en cualquier otro instante, ya sea pasado o futuro. Sin equivocación, la física clásica declara que el pasado y el futuro están grabados en el presente. Esta característica es también compartida por la relatividad especial y la general. Aunque los conceptos relativistas de pasado y futuro son más sutiles que sus familiares contrapartidas clásicas (capítulos 3 y 5), las ecuaciones de la relatividad, junto con una evaluación completa del presente, los determinan por completo.

Sin embargo, en la década de 1930 los físicos se vieron obligados a introducir todo un nuevo esquema conceptual llamado *mecánica cuántica*. De forma completamente inesperada, encontraron que sólo las leyes cuánticas eran capaces de resolver un montón de rompecabezas y explicar una gran variedad de datos recién adquiridos procedentes de los átomos y el reino subatómico. Pero incluso si usted hace las medidas más perfectas posibles de cómo son hoy las cosas, lo más que puede esperar es predecir la *probabilidad* de que las cosas sean de una manera u otra en un instante escogido en el futuro, o de que las cosas fueron de una manera u otra en algún instante escogido en el pasado. El universo, según la mecánica cuántica, *no* está grabado en el presente; el universo, según la mecánica cuántica, participa en un juego de azar.

Aunque sigue habiendo controversia sobre cómo deberían interpretarse exactamente estos desarrollos, la mayoría de los físicos están de acuerdo en que la

probabilidad está profundamente entretejida en el tejido de la realidad cuántica. Mientras que la intuición humana, y su encarnación en la física clásica, imagina una realidad en la que las cosas son siempre decididamente de una manera *o* de otra, la mecánica cuántica describe una realidad en la que las cosas a veces se mantienen en un estado confuso entre ser parcialmente de una manera y parcialmente de otra. Las cosas sólo se hacen definidas cuando una observación apropiada las obliga a abandonar las posibilidades cuánticas y asentarse en un resultado específico. Sin embargo, el resultado que se hace real no puede predecirse: sólo podemos predecir las probabilidades de que las cosas resulten de una manera o de otra.

Esto, hablando francamente, es muy extraño. No estamos acostumbrados a una realidad que permanece ambigua hasta que es percibida. Pero la singularidad de la mecánica cuántica no se detiene aquí. Tan sorprendente al menos como ésta es una característica que se remonta a un artículo escrito por Einstein en 1935 con dos colegas más jóvenes, Nathan Rosen y Boris Podolsky, que pretendía ser un ataque a la teoría cuántica. [1.3] Con los giros posteriores del progreso científico, el artículo de Einstein puede considerarse ahora como uno de los primeros en señalar que la mecánica cuántica —si se toma al pie de la letra— implica que algo que uno observa aquí puede estar *instantáneamente* ligado a algo que está sucediendo allí, independientemente de la distancia. Einstein consideraba absurdas tales conexiones instantáneas e interpretaba su emergencia de las matemáticas de la teoría cuántica como una prueba de que la teoría necesitaba mucho desarrollo antes de que alcanzase una forma aceptable. Pero en la década de 1980, cuando tanto los desarrollos teóricos como los tecnológicos permitieron someter a escrutinio experimental a estos supuestos absurdos cuánticos, los

investigadores confirmaron que puede haber un vínculo instantáneo entre lo que sucede en lugares ampliamente separados. En condiciones de laboratorio prístinas, lo que Einstein consideraba absurdo sucede realmente (capítulo 4).

Las implicaciones de estas características de la mecánica cuántica para nuestra imagen de la realidad son tema de investigación en curso. Muchos científicos, yo mismo incluido, las ven como parte de una radical puesta al día cuántica del significado y las propiedades del espacio. Normalmente, la separación espacial implica independencia física. Si usted quiere controlar lo que está sucediendo en el otro lado de un campo de fútbol, tiene que ir allí, o, como mínimo, tiene que enviar a alguien o algo (el ayudante del entrenador, moléculas de aire que transmiten el habla, un destello de luz para llamar la atención de alguien, etc.) que cruce el campo para transmitir su influencia. Si no lo hace —si se queda espacialmente aislado—usted no tendrá ningún impacto, puesto que el espacio interpuesto asegura la ausencia de una conexión física. La mecánica cuántica desafía esta visión revelando, al menos en ciertas circunstancias, una capacidad para trascender el espacio; las conexiones cuánticas de largo alcance pueden puentear la separación espacial. Dos objetos pueden estar muy alejados en el espacio, pero por lo que concierne a la mecánica cuántica es como si fueran una única entidad. Además, debido al rígido vínculo entre espacio y tiempo encontrado por Einstein, las conexiones cuánticas también tienen tentáculos temporales. Pronto veremos algunos experimentos ingeniosos y realmente maravillosos que han explorado recientemente varias de las sorprendentes interconexiones espacio-temporales implicadas por la mecánica cuántica y que, como veremos, desafían fuertemente la visión del mundo clásica e intuitiva que muchos de nosotros mantenemos.

A pesar de estas ideas impresionantes, sigue habiendo una característica muy básica del tiempo —que parece tener una dirección que apunta del pasado al futuro— para la que ni la relatividad ni la mecánica cuántica han ofrecido una explicación. En su lugar, el único progreso convincente ha venido de la investigación en un área de la física llamada *cosmología*.

La realidad cosmológica

Abrir nuestros ojos a la verdadera naturaleza del universo ha sido siempre uno de los objetivos fundamentales de la física. Es difícil imaginar una experiencia más reveladora que aprender, como hemos hecho durante el último siglo, que la realidad que experimentamos es tan sólo un pálido reflejo de la realidad que es. Pero la física tiene también el encargo igualmente importante de explicar los elementos de realidad que de verdad experimentamos. De nuestro rápido paseo a través de la historia de la física podría parecer que esto ya se ha conseguido, que la experiencia ordinaria es explicada por los avances científicos previos al siglo XX. En cierta medida, esto es cierto. Pero incluso cuando se trata de lo cotidiano, estamos lejos de una comprensión completa. Y entre las características de la experiencia común que se han resistido a una explicación completa hay una que incide en uno de los más profundos misterios no resueltos de la física moderna: el misterio que el gran físico británico sir Arthur Eddington llamó la *flecha del tiempo*. **[1.4]**

Damos por supuesto que hay una dirección en la forma en que las cosas se despliegan en el tiempo. Los huevos se rompen, pero no se desrompen; las velas se consumen, pero no se recomponen; los recuerdos son del pasado, pero

nunca del futuro; las personas envejecen, pero no rejuvenecen. Estas asimetrías gobiernan nuestras vidas; la distinción entre hacia delante y hacia atrás en el tiempo es un elemento dominante de la realidad de la experiencia. Si hacia delante y hacia atrás en el tiempo mostrasen la misma simetría que vemos entre izquierda y derecha, o delante y detrás, el mundo sería irreconocible. Los huevos se desromperían con tanta frecuencia como se rompían; las velas se reharían con tanta frecuencia como se consumían; recordaríamos tanto del futuro como del pasado; las personas rejuvenecerían con tanta frecuencia como envejecían. Ciertamente, semejante realidad con simetría temporal no es nuestra realidad. Pero ¿de dónde procede esta asimetría temporal? ¿Qué es responsable de la más básica de las propiedades del tiempo?

El caso es que las leyes de la física aceptadas y conocidas no muestran tal asimetría (capítulo 6); cada dirección del tiempo, hacia delante y hacia atrás es tratada por las leyes sin distinción. *Y ése es el origen de un enorme interrogante*. Nada en las ecuaciones de la física fundamental muestra ningún indicio de tratar una dirección del tiempo de forma diferente de la otra, y eso está en total contradicción con todo lo que experimentamos. [1.5]

Sorprendentemente, incluso si nos estamos centrando en una característica familiar de la vida cotidiana, la resolución más convincente de este desajuste entre la física fundamental y la experiencia básica requiere que contemplemos el menos familiar de los sucesos: el comienzo del universo. Esta comprensión tiene sus raíces en la obra del gran físico del siglo XIX Ludwig Boltzmann, y en los años transcurridos desde entonces ha sido desarrollada por muchos investigadores, muy especialmente el matemático británico Roger Penrose. Como veremos, condiciones físicas especiales en el nacimiento del universo

(un entorno altamente ordenado en o inmediatamente después del *big bang*) pueden haber impreso una dirección en el tiempo, algo parecido a dar cuerda a un reloj retorciendo su muelle hasta un estado inicial altamente ordenado, lo que le permite ponerse en marcha. Así, en un sentido que haremos preciso, la ruptura —en oposición a la recomposición— de un huevo guarda testimonio de las condiciones en el nacimiento del universo hace unos 14.000 millones de años.

Este vínculo inesperado entre la experiencia cotidiana y el universo primitivo proporciona una idea de por qué los sucesos se desarrollan en una dirección del tiempo y nunca en la inversa, pero no resuelve por completo el misterio de la flecha del tiempo. En su lugar, desplaza el enigma al ámbito de la *cosmología* —el estudio del origen y evolución del cosmos entero— y nos obliga a descubrir si el universo tuvo realmente el comienzo altamente ordenado que requiere esta explicación de la flecha del tiempo.

La cosmología es una de las disciplinas más antiguas en cautivar a nuestra especie. Y eso no es extraño. Somos contadores de historias, y ¿qué historia puede ser más grande que la historia de la creación? Durante los últimos milenios, las tradiciones filosóficas y religiosas en todo el mundo han ofrecido muchas versiones de cómo empezaron todas las cosas, es decir, cómo empezó el universo. También la ciencia, durante su larga historia, ha hecho pruebas en cosmología. Pero fue el descubrimiento de Einstein de la relatividad general el que marcó el nacimiento de la cosmología científica moderna.

Muy poco después de que Einstein publicara su teoría de la relatividad general, él y otros la aplicaron al universo como un todo. En pocas décadas, su investigación llevó a la herramienta tentativa para lo que ahora se denomina la teoría del *big bang*, una aproximación que explicaba

satisfactoriamente muchas características de las observaciones astronómicas (capítulo 8). A mediados de la década de 1960 se acumuló evidencia en apoyo de la cosmología del *big bang*, a medida que las observaciones revelaban un brillo casi uniforme de radiación de microondas que llena el espacio —invisible a simple vista pero fácilmente medido por detectores de microondas— que estaba predicho por la teoría. Y ciertamente en la década de 1970, tras una década de examen más detallado y progreso sustancial en la determinación de cómo responden los ingredientes básicos del cosmos a cambios extremos en calor y temperatura, la teoría del *big bang* se aseguró su lugar como teoría cosmológica dominante (capítulo 9).

A pesar de sus éxitos, no obstante, la teoría tuvo reveses importantes. Tenía problemas para explicar por qué el espacio tiene la forma global revelada por observaciones astronómicas detalladas, y no ofrecía ninguna explicación de por qué la temperatura de la radiación de microondas, intensamente estudiada desde su descubrimiento, aparece completamente uniforme en el cielo. Además, lo que es de interés fundamental para la historia que estamos contando, la teoría del *big bang* no ofrecía ninguna razón convincente de por qué el universo podría haber estado altamente ordenado casi en el mismo principio, como requería la explicación para la flecha del tiempo.

Estas y otras cuestiones abiertas inspiraron un avance fundamental a finales de la década de 1970 y principios de la de 1980, conocido como *cosmología inflacionaria* (capítulo 10). La cosmología inflacionaria modifica la teoría del *big bang* insertando un estallido extraordinariamente breve de expansión sorprendentemente rápida durante los primeros momentos del universo (en este enfoque, el tamaño del universo aumentó en un factor mayor de un billón de trillones en menos de una billonésima de

trillonésima de segundo). Como quedará claro, este tremendo crecimiento del universo joven hace mucho para llenar los huecos que deja el modelo del *big bang* —explicar la forma del espacio y la uniformidad de la radiación de microondas, y también sugerir por qué el universo primitivo podría haber estado altamente ordenado— proporcionando así un avance importante hacia la explicación de las observaciones astronómicas y la flecha del tiempo que todos experimentamos (capítulo 11).

Pero a pesar de estos éxitos crecientes, durante dos décadas la cosmología inflacionaria ha estado ocultando su propio secreto embarazoso. Como la teoría del *big bang* estándar a la que modificó, la cosmología inflacionaria descansa en las ecuaciones que Einstein descubrió con su teoría de la relatividad general. Aunque volúmenes de artículos de investigación atestiguan la potencia de las ecuaciones de Einstein para describir con precisión objetos grandes y masivos, los físicos sabían que un análisis teórico preciso de objetos pequeños —tales como el universo observable cuando sólo tenía una edad de una fracción de segundo— requiere el uso de la mecánica cuántica. El problema, no obstante, es que cuando las ecuaciones de la relatividad general se combinan con las de la mecánica cuántica, el resultado es desastroso. Las ecuaciones fracasan por completo, y esto nos impide determinar cómo nació el universo y si en su nacimiento satisfacía las condiciones necesarias para explicar la flecha del tiempo.

No es exagerado describir esta situación como una pesadilla para el teórico: la ausencia de herramientas matemáticas con las que analizar un dominio vital que yace más allá de la accesibilidad experimental. Y puesto que espacio y tiempo están tan completamente entretejidos en este dominio inaccesible particular —el origen del universo — entender completamente el espacio y el tiempo requiere

que encontremos ecuaciones que puedan tratar las condiciones extremas de enormes densidad, energía y temperatura características de los primeros momentos del universo. Éste es un objetivo absolutamente esencial, y un objetivo que, en opinión de muchos físicos, requiere desarrollar lo que se denomina una *teoría unificada*.

La realidad unificada

Durante los últimos siglos, los físicos han tratado de consolidar nuestra comprensión del mundo natural demostrando que fenómenos diversos y aparentemente distintos están gobernados en realidad por un único conjunto de leyes físicas. Para Einstein, este objetivo de unificación —de explicar el conjunto más amplio de fenómenos con los mínimos principios físicos— se convirtió en la pasión de su vida. Con sus dos teorías de la relatividad, Einstein unificó espacio, tiempo y gravedad. Pero este éxito sólo le animó a pensar en algo más grande. Soñó con encontrar una herramienta única y general capaz de abarcar todas las leyes de la Naturaleza. Llamó a esa herramienta una teoría unificada. Aunque de vez en cuando corrieron rumores de que Einstein había encontrado una teoría unificada, todas esas afirmaciones resultaron carecer de base; el sueño de Einstein quedó insatisfecho.

La fijación de Einstein en una teoría unificada durante sus últimos treinta años de vida le distanció de la corriente principal de la física. Muchos científicos más jóvenes pensaban que su búsqueda tenaz de la más grande de todas las teorías eran desvaríos de un gran hombre que, en sus últimos años, había tomado un camino equivocado. Pero en las décadas transcurridas desde la muerte de Einstein, un número creciente de físicos han asumido su búsqueda

inacabada. Hoy, desarrollar una teoría unificada figura entre los problemas más importantes de la física teórica.

Durante muchos años, los físicos encontraron que el mayor obstáculo para hacer realidad una teoría unificada era el conflicto fundamental entre los dos mayores avances de la física del siglo XX: la relatividad general y la mecánica cuántica. Aunque estas dos herramientas se aplican normalmente en dominios muy diferentes —la relatividad general a las cosas grandes como estrellas y planetas, y la mecánica cuántica a cosas pequeñas como moléculas y átomos— cada teoría pretende ser universal y trabajar en todos los dominios. Sin embargo, como se mencionó antes, cuando quiera que la teorías se utilizan conjuntamente, sus ecuaciones combinadas generan respuestas absurdas. Por ejemplo, cuando se utiliza la mecánica cuántica con la relatividad general para calcular la probabilidad de que tenga lugar un proceso u otro en el que intervendrá la gravedad, la respuesta que se suele encontrar no es algo como una probabilidad del 24 por 100 o el 63 por 100 o el 91 por 100; en su lugar, de las matemáticas combinadas surge una probabilidad *infinita*. Esto no significa una probabilidad tan alta que usted debería apostar todo su dinero a ella porque es un chollo. Las probabilidades mayores que el 100 por 100 no tienen significado. Los cálculos que dan una probabilidad infinita muestran simplemente que las ecuaciones combinadas de la relatividad general y la mecánica cuántica han perdido el sentido.

Los científicos han sido conscientes de la tensión entre relatividad general y mecánica cuántica durante más de medio siglo, pero durante mucho tiempo sólo unos pocos relativamente se sintieron obligados a buscar una solución. La mayoría de los investigadores utilizaban la relatividad general solamente para analizar objetos grandes y masivos,

mientras reservaban la mecánica cuántica solamente para analizar objetos pequeños y ligeros, manteniendo ambas teorías a una distancia segura una de otra de modo que su hostilidad mutua no se manifestara. Durante años, esta aproximación ha permitido avances espectaculares en nuestra comprensión de cada dominio, pero no dio una paz duradera.

Unos pocos dominios —situaciones físicas extremas que son a la vez masivas y minúsculas— caen directamente en la zona desmilitarizada, requiriendo que se utilicen simultáneamente la relatividad general y la mecánica cuántica. El centro de un agujero negro, en el que una estrella entera ha sido comprimida por su propio peso en un punto minúsculo, y el *big bang*, en el que se supone que todo el universo observable ha sido comprimido en una pepita mucho más pequeña que un simple átomo, ofrecen los dos ejemplos más familiares. Sin una unión satisfactoria entre relatividad general y mecánica cuántica, el final de las estrellas que colapsan y el origen del universo seguirían siendo misteriosos para siempre. Muchos científicos estaban dispuestos a dejar de lado estos dominios, o al menos a no reflexionar sobre ellos hasta que se hubieran superado otros problemas más tratables.

Pero algunos investigadores no podían esperar. Un conflicto en las leyes de la física conocidas significa un fallo para entender una verdad profunda y eso era suficiente para impedir el descanso de estos científicos. Quienes se sumieron en ello, sin embargo, encontraron las aguas profundas y las comentes rápidas. Durante largos períodos de tiempo, la investigación hizo pequeños progresos; las cosas parecían poco prometedoras. Incluso así, la tenacidad de aquellos que tuvieron la determinación de permanecer en la carrera y mantener vivo el sueño de unir la relatividad general y la mecánica cuántica está siendo recompensada.

Los científicos están ahora recorriendo caminos desbrozados por aquellos exploradores y acercándose a una fusión armoniosa de las leyes de lo grande y lo pequeño. Muchos coinciden en que la mejor candidata para ello es una aproximación conocida como la *teoría de supercuerdas* (capítulo 12).

Como veremos, la teoría de supercuerdas empieza proponiendo una respuesta nueva a una pregunta antigua: ¿cuáles son los constituyentes más pequeños e indivisibles de la materia? Durante muchas décadas, la respuesta convencional ha sido que la materia está compuesta de partículas —electrones y quarks— que pueden ser modeladas como puntos que son indivisibles y que no tienen tamaño ni estructura interna. La teoría convencional afirma, y los experimentos confirman, que estas partículas se combinan de diversas maneras para dar protones, neutrones, y la amplia variedad de átomos y moléculas que forman todo lo que siempre hemos encontrado. La teoría de supercuerdas cuenta una historia diferente. No niega el papel clave desempeñado por electrones, quarks y las otras especies de partículas reveladas por el experimento, pero afirma que estas partículas no son puntos. En lugar de ello, según la teoría de supercuerdas, cada partícula está compuesta de un minúsculo filamento de energía, unos cien trillones de veces más pequeños que un simple núcleo atómico (un tamaño mucho más pequeño que lo que actualmente podemos sondear), que tiene la forma de una pequeña cuerda. E igual que una cuerda de violín puede vibrar con pautas diferentes, cada una de las cuales produce un tono musical diferente, los filamentos de la teoría de supercuerdas también pueden vibrar con pautas diferentes. Estas vibraciones, sin embargo, no producen notas musicales diferentes; lo que la teoría afirma, y esto es extraordinario, es que producen diferentes propiedades de

partículas. Una cuerda minúscula que vibra con una pauta tendría la masa y la carga eléctrica de un electrón; según la teoría, semejante cuerda vibrante podría ser lo que tradicionalmente hemos llamado un electrón. Una cuerda minúscula que vibra con una pauta diferente tendría las propiedades exigidas para identificarla como un quark, un neutrón o cualquier otro tipo de partícula. Todas las especies de partículas están unificadas en la teoría de supercuerdas puesto que cada una aparece de una pauta vibratoria diferente ejecutada por la misma entidad subyacente.

Podría parecer que ir de puntos a cuerdas-tan-pequeñas-que-parecen-puntos no es un cambio de perspectiva terriblemente importante. Pero lo es. A partir de estos comienzos humildes, la teoría de supercuerdas combina la relatividad general y la mecánica cuántica en una teoría única y consistente, eliminando las probabilidades perniciosamente infinitas que afligen a las uniones intentadas previamente. Y por si eso no fuera suficiente, la teoría de supercuerdas ha revelado la anchura necesaria para hilvanar todas las fuerzas de la Naturaleza y toda la materia en el mismo tapiz teórico. En resumen, la teoría de supercuerdas es un candidato fundamental para la teoría unificada de Einstein.

Éstas son grandes afirmaciones y, si son correctas, representan un paso adelante trascendental. Pero la característica más sorprendente de la teoría de supercuerdas, una que no dudo que haría latir con fuerza el corazón de Einstein, es su profundo impacto en nuestra comprensión del tejido del cosmos. Como veremos, la fusión que propone la teoría de supercuerdas entre la relatividad general y la mecánica cuántica sólo es razonable matemáticamente si sometemos nuestra idea de espaciotiempo a otro cambio. En lugar de las tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal de la

experiencia común, la teoría de supercuerdas requiere nueve dimensiones espaciales y una dimensión temporal. Y, en una encarnación más robusta de la teoría de supercuerdas conocida como *teoría M*, la unificación requiere *diez* dimensiones espaciales y una dimensión temporal —un substrato cósmico compuesto de un total de once dimensiones espaciotemporales—. Puesto que no vemos estas dimensiones extras, la teoría de supercuerdas nos está diciendo que *hasta ahora sólo hemos atisbado una magra rebanada de realidad*.

Por supuesto, la falta de evidencia observacional de dimensiones extras también podría significar que no existen y que la teoría de supercuerdas es errónea. Sin embargo, sacar esta conclusión sería extraordinariamente apresurado. Incluso décadas antes del descubrimiento de la teoría de supercuerdas, científicos visionarios, incluyendo a Einstein, sopesaron la idea de dimensiones espaciales más allá de las que vemos, y sugirieron dónde podrían estar ocultas. Los teóricos de cuerdas han refinado sustancialmente estas ideas y han encontrado que las dimensiones extras podrían estar tan apretadamente estrujadas que son demasiado pequeñas para que las veamos nosotros o cualquiera de nuestros aparatos actuales (capítulo 12), o podrían ser grandes pero invisibles para la forma en que sondeamos el universo (capítulo 13). Cualquiera de estos escenarios tiene profundas implicaciones. Mediante su impacto en las vibraciones de las cuerdas, las formas geométricas de dimensiones minúsculas apretadas podrían tener respuestas para algunas de las preguntas más básicas, tales como por qué nuestro universo tiene estrellas y planetas. Y el lugar que ofrecen grandes dimensiones espaciales extras podría permitir algo aún más extraordinario: otros mundos vecinos, no vecinos en el espacio ordinario sino vecinos en las

dimensiones extra, de los que hasta ahora hemos sido completamente inconscientes.

Aunque es una idea atrevida, la existencia de dimensiones extras no es simplemente un castillo en el aire. Puede ser verificable dentro de poco. Si existen, las dimensiones extras pueden llevar a resultados experimentales en la siguiente generación de colisionadores de átomos, como serían la primera síntesis humana de un agujero negro microscópico o la producción de una enorme variedad de nuevas especies de partículas nunca antes descubiertas (capítulo 13). Estos y otros resultados exóticos pueden ofrecer la primera evidencia de dimensiones más allá de las directamente visibles, que nos llevan un paso más cerca de establecer la teoría de supercuerdas como la teoría unificada largo tiempo buscada.

Si la teoría de supercuerdas se prueba correcta estaremos obligados a aceptar que la realidad que hemos conocido es tan sólo una gasa delicada que cubre el tejido cósmico grueso y de rica textura. A pesar de la declaración de Camus, determinar el número de dimensiones espaciales —y, en particular, descubrir que no hay sólo tres— proporcionaría mucho más que un interesante detalle científico pero en definitiva intrascendente. El descubrimiento de dimensiones extras mostraría que la totalidad de la experiencia humana nos había dejado completamente ignorantes de un aspecto básico y esencial del universo. Afirmaría que incluso estas características del cosmos que hemos pensado que son fácilmente accesibles a los sentidos humanos no tienen por qué serlo.

Realidad pasada y realidad futura

Con el desarrollo de la teoría de supercuerdas los investigadores se sienten optimistas porque finalmente tenemos una herramienta que no fallará en ninguna circunstancia, por extrema que sea, permitiéndonos un día escudriñar con nuestras ecuaciones y aprender cómo eran las cosas en el mismo momento en que se puso en marcha el universo tal como lo conocemos. Hasta la fecha, nadie ha alcanzado la destreza suficiente con la teoría para aplicarla inequívocamente al *big bang*, pero comprender la cosmología según la teoría de supercuerdas se ha convertido en una de las máximas prioridades de la investigación actual. Durante los últimos años, intensos programas de investigación en cosmología de supercuerdas en todo el mundo han dejado nuevos marcos cosmológicos (capítulo 13), han sugerido nuevas maneras de poner a prueba la teoría de supercuerdas utilizando observaciones astrofísicas (capítulo 14), y han proporcionado algunas de las primeras ideas sobre el papel que puede desempeñar la teoría para entender la flecha del tiempo.

La flecha del tiempo, a través del papel definitorio que desempeña en la vida cotidiana y su íntimo vínculo con el origen del universo, yace en un umbral singular entre la realidad que experimentamos y la realidad más refinada que la ciencia de vanguardia trata de desvelar. Como tal, la cuestión de la flecha del tiempo ofrece un hilo común que corre a lo largo de muchos de los desarrollos que discutiremos, y este hilo aflorará repetidamente en los capítulos que siguen. Esto es adecuado. De los muchos factores que configuran nuestras vidas, el tiempo está entre los más dominantes. A medida que sigamos ganando facilidad con la teoría de supercuerdas y su extensión, la teoría M, nuestras ideas cosmológicas se harán más profundas, y arrojarán una luz más precisa sobre el origen del tiempo y su flecha. Si dejamos volar a nuestra

imaginación, podemos incluso concebir que la profundidad de nuestra comprensión nos permitirá un día navegar en el espaciotiempo y con ello explorar dominios que, hasta este momento de nuestra experiencia, permanecen mucho más allá de lo que podemos acceder (capítulo 15).

Por supuesto, es extraordinariamente poco probable que alguna vez consigamos ese poder. Pero incluso si nunca alcanzamos esa capacidad de controlar el espacio y el tiempo, una comprensión profunda confiere su propia autoridad. Nuestra comprensión de la verdadera naturaleza del espacio y el tiempo sería un testimonio de la capacidad del intelecto humano. Finalmente llegaríamos a conocer el espacio y el tiempo —los silenciosos y siempre presentes marcadores que delimitan las más remotas fronteras de la experiencia humana.

La mayoría de edad del espacio y el tiempo

Cuando hace muchos años pasé la última página de *El mito de Sísifo* estaba sorprendido por la sensación general de optimismo que se desprendía del texto. Después de todo, un hombre condenado a empujar una roca hasta la cima de una colina con el pleno conocimiento que volverá a rodar hasta abajo, obligándole a empujar de nuevo, no es el tipo de historia que uno espera que tenga un final feliz. Pero Camus encontraba mucha esperanza en la capacidad de Sísifo para ejercer su libre albedrío, para enfrentarse a innumerables obstáculos, y para afirmar su decisión de sobrevivir incluso estando condenado a una tarea absurda dentro de un universo indiferente. Renunciando a todo lo que hay más allá de la experiencia inmediata, y dejando de buscar cualquier tipo de comprensión más profunda o de sentido más profundo, argumentaba Camus, Sísifo triunfa.

Me conmovió la capacidad de Camus para discernir esperanza donde la mayoría de los demás sólo vería desesperación. Pero cuando era adolescente, y aún más en las décadas posteriores, yo encontré que no podía aceptar la afirmación de Camus de que una comprensión más profunda del universo no haría la vida más rica o más valiosa. Mientras Sísifo era el héroe de Camus, los más grandes de los científicos —Newton, Einstein, Niels Bohr y Richard Feynman— se convirtieron en los míos. Y cuando leí la descripción que hacía Feynman de una rosa —donde explicaba que él podía sentir la fragancia y la belleza de la flor tan bien como cualquiera, pero que su conocimiento de la física enriquecía enormemente la experiencia porque también podía incluir la maravilla y magnificencia de los procesos subatómicos, atómicos y moleculares subyacentes — quedé enganchado para siempre. Quería lo que Feynman describía: valorar la vida y experimentar el universo en todos los niveles posibles, no sólo en aquellos que han resultado ser accesibles a nuestros frágiles sentidos humanos. La búsqueda de la comprensión más profunda del cosmos se convirtió en la pasión de mi vida.

Como físico profesional, hace tiempo que he comprendido que había mucha ingenuidad en mi encaprichamiento con la física en el instituto. Los físicos no pasan sus días de trabajo en general contemplando flores en un estado de sobrecogimiento cósmico. En lugar de ello, dedicamos mucho de nuestro tiempo a bregar con ecuaciones matemáticas complicadas garabateadas en pizarras repletas. El avance puede ser lento. Ideas prometedoras llevan, en la mayoría de los casos, a ninguna parte. Así es la naturaleza del progreso científico. Pese a todo, incluso durante períodos de progresos mínimos, he descubierto que el esfuerzo dedicado a devanarme los sesos y calcular sólo me hace sentirme en más íntima

conexión con el cosmos. He descubierto que uno puede conocer el universo no sólo resolviendo sus misterios sino también sumergiéndose en ellos. Las respuestas son grandes. Las respuestas confirmadas por los experimentos son aún más grandes. Pero incluso las respuestas que en última instancia se muestran erróneas representan el resultado de un compromiso profundo con el cosmos —un compromiso que arroja una luz intensa sobre las preguntas, y con ello sobre el propio universo—. Incluso cuando la roca asociada con una exploración científica concreta rueda hasta abajo, aprendemos algo y nuestra experiencia del cosmos se enriquece.

Por supuesto, la historia de la ciencia revela que la roca de nuestra indagación científica colectiva —con contribuciones de innumerables científicos de todos los continentes y en todos los siglos— no rueda montaña abajo. A diferencia de Sísifo, no empezamos desde cero. Cada generación recoge de las anteriores, presta homenaje a la creatividad, intuición y trabajo duro de sus predecesoras y los lleva un poco más lejos. Nuevas teorías y medidas más refinadas son la marca del progreso científico, y dicho progreso construye sobre lo que vino antes, sin borrar la pizarra casi nunca. Puesto que es así, nuestra tarea no es absurda ni estéril. Empujando la roca montaña arriba emprendemos la más exquisita y noble de las tareas: desvelar este lugar que llamamos hogar, revelar las maravillas que descubrimos y pasar nuestro conocimiento a los que nos siguen.

Para una especie que, para escalas de tiempo cósmicas, apenas ha aprendido a caminar derecho, los desafíos son tremendos. Pese a todo, durante los trescientos últimos años, a medida que hemos avanzado desde la realidad clásica a la relativista y luego a la realidad cuántica, y hemos pasado ahora a exploraciones de la realidad

unificada, nuestras mentes e instrumentos han barrido la gran extensión de espacio y tiempo, llevándonos más cerca que nunca de un mundo que se ha mostrado como un hábil maestro del disfraz. Y a medida que hemos continuado desenmascarando lentamente el cosmos, hemos ganado la intimidad que sólo viene cuando nos acercamos a la claridad de la verdad. Las exploraciones tienen mucho por recorrer, pero para muchos parece que nuestra especie está llegando finalmente al fin de la infancia.

Por supuesto, hace tiempo que se está gestando nuestra mayoría de edad aquí, en las afueras de la Vía Láctea. [1.6] De una forma u otra, hemos estado explorando nuestro mundo y contemplando el cosmos durante miles de años. Pero durante la mayor parte de ese tiempo sólo hemos hecho breves incursiones en lo desconocido, volviendo a casa cada vez algo más sabios pero básicamente sin cambios. Se requiere el desparpajo de un Newton para plantar la bandera de la indagación científica moderna y no volver atrás. Desde entonces hemos llegado cada vez más alto. Y todos nuestros viajes empezaron con una simple pregunta.

¿Qué es el espacio?

— 2 —

El universo y el cubo

¿Es el espacio una abstracción humana o una entidad física?

No es muy corriente que un cubo de agua sea el protagonista en un debate de trescientos años de duración. Pero un cubo que perteneció a sir Isaac Newton no es un cubo cualquiera, y un pequeño experimento que él describió en 1689 ha tenido una profunda influencia sobre algunos de los más grandes físicos del mundo desde entonces. El experimento es éste: tome un cubo lleno de agua, cuélguelo de una cuerda, retuerza la cuerda con fuerza de modo que esté lista para desenroscarse, y suéltela. Al principio, el cubo empieza a girar pero el agua en su interior permanece en reposo; la superficie del agua permanece clara y plana. A medida que el cubo toma velocidad, su movimiento se comunica poco a poco al agua por fricción, y el agua empieza a girar también. Cuando lo hace, la superficie del agua toma una forma cóncava, más alta en el borde y más baja en el centro, como en la figura 2.1.

Ése es el experimento, no es algo que haga que el corazón se acelere. Pero un poco de reflexión mostrará que este cubo de agua en rotación es extraordinariamente enigmático. Y comprenderlo, algo que todavía no hemos

hecho al cabo de tres siglos, figura entre los pasos más importantes hacia la comprensión de la estructura del universo. Entender por qué necesitará cierta base, pero bien vale la pena el esfuerzo.

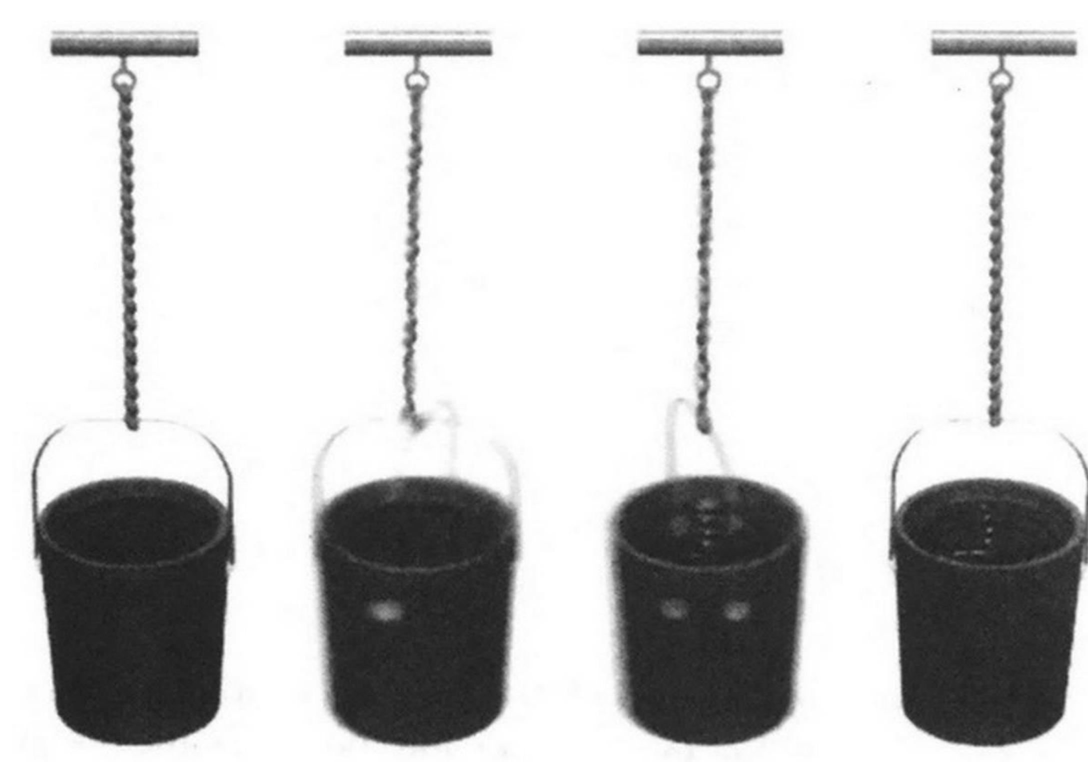


FIGURA 2.1. La superficie del agua empieza plana y continúa así cuando el cubo comienza a girar. Posteriormente, cuando el agua también empieza a girar, su superficie se hace cóncava, y sigue cóncava mientras el agua gira, incluso cuando el cubo se frena y se detiene.

Relatividad antes de Einstein

«Relatividad» es una palabra que asociamos con Einstein, pero el concepto se remonta mucho más atrás. Galileo, Newton y muchos otros eran perfectamente conscientes de que la velocidad —la rapidez y dirección del movimiento de

un objeto— es relativa. En términos modernos, desde el punto de vista del bateador una bola rápida bien lanzada podría estar acercándose a 150 kilómetros por hora. Desde el punto de vista de la bola es el bateador el que se está aproximando a 150 kilómetros por hora. Las dos descripciones son exactas; se trata simplemente de una cuestión de perspectiva. El movimiento tiene significado sólo en un sentido relacional: la velocidad de un objeto sólo puede especificarse con relación a la de otro objeto. Usted probablemente lo ha experimentado. Cuando el tren en el que se encuentra está al lado de otro y usted ve el movimiento relativo, no puede decir inmediatamente qué tren se está moviendo realmente sobre la vía. Galileo describió este efecto utilizando el medio de transporte de su época, los barcos. Dejemos caer una moneda en un barco que se mueve uniformemente, decía Galileo, y caerá en nuestros pies como lo haría en tierra firme. Desde su perspectiva, usted está justificado para declarar que está en reposo y es el agua la que pasa rozando el casco del barco. Y puesto que desde este punto de vista usted no se está moviendo, el movimiento de la moneda con respecto a su pie será exactamente el que habría sido antes de que usted se embarcara.

Por supuesto, hay circunstancias en las que su movimiento parece intrínseco, cuando usted puede sentirlo y parece capaz de afirmar, sin recurrir a comparaciones externas, que usted se está moviendo decididamente. Esto es lo que sucede con el movimiento acelerado, movimiento en el que cambia su velocidad y/o su dirección. Si el barco en el que se encuentra se inclina repentinamente a un lado u otro, o se frena o acelera, o cambia de dirección dando un giro, o queda atrapado en un remolino y da vueltas y vueltas, usted sabe que se está moviendo, y se da cuenta de esto sin mirar afuera y comparar su movimiento con

algún punto de referencia escogido. Incluso si sus ojos están cerrados, usted sabe que se está moviendo porque lo siente. Así pues, mientras que usted no puede sentir el movimiento con celeridad constante que se dirige en una trayectoria invariable en línea recta —*movimiento con velocidad constante*, se denomina— usted sí puede sentir *cambios* en su velocidad.

Pero si piensa en ello un momento, hay algo extraño en esto. ¿Qué hay en los cambios en velocidad que les permite por sí solos tener un significado intrínseco? Si la velocidad es algo que tiene sentido sólo por comparación —diciendo que esto se está moviendo con respecto a aquello— ¿cómo es que los cambios en velocidad son de algún modo diferentes y no requieren también comparaciones para darles significado? De hecho, ¿es cierto realmente que no requieran hacer una comparación? ¿No cabe la posibilidad de que haya una comparación implícita u oculta que realmente actúa cada vez que experimentamos o nos referimos a un movimiento acelerado? Ésta es una pregunta fundamental hacia la que nos encaminamos porque, quizá sorprendentemente, afecta a las cuestiones más profundas que rodean el significado de espacio y tiempo.

Las ideas de Galileo sobre el movimiento, y muy especialmente su afirmación de que la Tierra misma se mueve, la costaron la ira de la Inquisición. Un Descartes más cauto, en sus *Principia Philosophiae*, trató de evitar un destino similar y expresó su idea del movimiento en un marco equivocado que no pudo resistir el riguroso examen a que la sometió Newton unos treinta años más tarde. Descartes hablaba de objetos que manifestaban una resistencia a los cambios en su estado de movimiento: algo que está en reposo permanecerá en reposo a menos que alguien o algo le obligue a moverse; algo que se está moviendo en línea recta a velocidad constante mantendrá

ese movimiento hasta que alguien o algo le obligue a cambiar. Pero ¿qué, preguntaba Newton, significan realmente estas nociones de «reposo» o «línea recta a velocidad constante»? ¿Reposo o velocidad constante con respecto a qué? ¿Reposo o velocidad constante desde qué punto de vista? Si la velocidad no es constante, ¿con respecto a qué o desde qué punto de vista no es constante? Descartes discutió correctamente aspectos del significado de movimiento, pero Newton comprendió que dejaba sin responder preguntas clave.

Newton —un hombre tan impulsado por la búsqueda de la verdad que en cierta ocasión introdujo una aguja roma entre su ojo y la cuenca ósea para estudiar la anatomía ocular y, más tarde como maestro de la Moneda, impuso el más duro de los castigos a los monederos falsos, enviando a más de un centenar a la horca— no toleraba el razonamiento falso o incompleto. De modo que decidió dejar las cosas claras. Esto le llevó a introducir el cubo. [2.1]

El cubo

Cuando dejamos el cubo, tanto éste como el agua en su interior estaban girando, con la superficie del agua formando una forma cóncava. La cuestión que planteaba Newton es ¿por qué la superficie del agua adopta esta forma? Bien, porque está girando, dice usted, y de la misma manera que nos sentimos empujados contra el costado de un automóvil cuando toma una curva cerrada, el agua se aprieta contra la pared del cubo cuando gira. Y la única posibilidad que le queda al agua presionada es ir hacia arriba. Este razonamiento es correcto, tal como está, pero elude el propósito real de la pregunta de Newton. Él quería saber qué significa decir que el agua está girando: girando

con respecto a qué. Newton bregaba con el fundamento mismo del movimiento y no estaba dispuesto a aceptar que el movimiento acelerado, tal como una rotación, es algo que está más allá de la necesidad de comparaciones externas. **[*1]**

Una sugerencia natural es utilizar el propio cubo como el objeto de referencia. Sin embargo, como Newton argumentó, esto falla. Al principio, cuando soltamos el cubo para que empiece a girar, hay decididamente un *movimiento relativo* entre el cubo y el agua, porque el agua no se mueve inmediatamente. Incluso así, la superficie del agua permanece plana. Luego, un poco más tarde, cuando el agua está girando y *no hay* movimiento relativo entre el cubo y el agua, la superficie del agua *es* cóncava. Entonces, tomando el cubo como nuestro objeto de referencia obtenemos exactamente lo contrario de lo que esperamos: cuando hay movimiento relativo, la superficie del agua es plana; y cuando no hay movimiento relativo, la superficie es cóncava.

De hecho, podemos llevar el experimento del cubo de Newton un pequeño paso más allá. Conforme el cubo siga girando, la cuerda se retorcerá de nuevo (en dirección contraria) haciendo que el cubo se frene y llegue por un instante al reposo, mientras el agua en su interior sigue girando. En este instante, el movimiento relativo entre el agua y el cubo es *el mismo* que era casi al principio del experimento (excepto por la diferencia intrascendente de movimiento en dirección de las agujas del reloj frente a movimiento contrario a las agujas), pero la forma de la superficie del agua es *diferente* (antes era plana, ahora es cóncava); esto muestra de forma concluyente que el movimiento relativo no puede explicar la forma de la superficie.

Habiendo descartado el cubo como referencia relevante para el movimiento del agua, Newton dio valientemente el paso siguiente. Imaginemos, sugirió, otra versión del experimento del cubo giratorio llevado a cabo en el espacio profundo, frío y completamente vacío. No podemos hacer exactamente el mismo experimento, puesto que la forma de la superficie del agua dependía en parte de la atracción de la gravedad terrestre, y en esta versión la Tierra está ausente. Entonces, para crear un ejemplo más factible, imaginemos que tenemos un cubo enorme —un cubo tan grande como un tiovivo de un parque de atracciones— que está flotando en la oscuridad del espacio vacío, e imaginemos que un valiente astronauta, Homer, está atado a la pared interior del cubo. (Newton no utilizó realmente este ejemplo; él sugirió utilizar dos piedras unidas por una cuerda, pero el punto en cuestión es el mismo.) El signo revelador de que el cubo está girando, el análogo a que el agua es empujada hacia afuera para dar una superficie cóncava, es que Homer se sentirá presionado contra el interior del cubo, la piel de su cara se estirará, su estómago se comprimirá ligeramente, y su pelo (los dos pelos) apuntará hacia la pared del cubo. Ésta es la pregunta: en el espacio *totalmente vacío* —no hay Sol, no hay Tierra, no hay aire, no hay donuts, no hay nada— ¿qué podría servir como el «algo» con respecto al cual está girando el cubo? A primera vista, puesto que estamos imaginando que el espacio está completamente vacío salvo por el cubo y su contenido, parece como si sencillamente no hubiese nada más para servir como el algo. Newton discrepaba.

Él respondió fijando el contenedor último como el sistema de referencia relevante: *el propio espacio*. Propuso que el escenario transparente y vacío en la que todos estamos inmersos, y dentro del cual tiene lugar todo movimiento, existe como una entidad física real a la que

llamó *espacio absoluto*. [2.2] No podemos captar el espacio absoluto, no podemos saborear ni oler ni oír el espacio absoluto, pero de todas formas Newton afirmaba que el espacio absoluto es algo. Es el algo, propuso, que ofrece la referencia más verdadera para la descripción del movimiento. Un objeto se está moviendo verdaderamente cuando se está moviendo con respecto al espacio absoluto. Y, más importante, concluía Newton, un objeto está acelerando verdaderamente cuando está acelerando con respecto al espacio absoluto.

Newton utilizó esta propuesta para explicar el experimento del cubo en la Tierra de la siguiente manera. Al principio del experimento, el cubo está girando con respecto al espacio absoluto, pero el agua está en reposo con respecto al espacio absoluto. Por eso es por lo que la superficie del agua es plana. Cuando el agua gira con el cubo, está ahora girando con respecto al espacio absoluto, y por eso es por lo que la superficie se vuelve cóncava. Cuando el cubo se frena debido a la rigidez de la cuerda, el agua sigue girando —girando con respecto al espacio absoluto— y por eso es por lo que su superficie sigue siendo cóncava. Y así, mientras que el movimiento relativo entre el agua y el cubo no puede dar cuenta de las observaciones, el movimiento relativo entre el agua y el espacio absoluto sí puede hacerlo. El propio espacio proporciona el sistema de referencia verdadero para definir el movimiento.

El cubo es tan sólo un ejemplo; el razonamiento es por supuesto mucho más general. Según la perspectiva de Newton, cuando usted toma una curva en un automóvil siente el cambio en su velocidad porque está acelerando con respecto al espacio absoluto. Cuando el avión en el que usted se encuentra se está preparando para despegar, usted se ve presionado contra el respaldo de su asiento porque está acelerando con respecto al espacio absoluto.

Cuando usted da vueltas sobre patines de hielo, siente que sus brazos se despegan hacia fuera porque está acelerando con respecto al espacio absoluto. Por el contrario, si alguien fuera capaz de girar toda la pista de patinaje mientras usted está quieto (suponiendo una situación idealizada de patines sin fricción) —que da lugar al mismo movimiento relativo entre usted y el hielo— no sentirá que sus brazos se despegan hacia fuera, porque no se está acelerando con respecto al espacio absoluto. Y sólo para asegurar que usted no se ha distraído por los detalles irrelevantes de ejemplos que utilizan el cuerpo humano, cuando las dos piedras de Newton unidas por una cuerda giran en el espacio vacío, la cuerda se pone tensa porque las piedras se están acelerando con respecto al espacio absoluto. El espacio absoluto tiene la última palabra en lo que significa moverse.

Pero ¿qué es realmente el espacio absoluto? Al tratar esta cuestión Newton respondió con un juego de piernas imaginativo y la fuerza del decreto. En el comienzo de los *Principia* escribió: «Yo no defino tiempo, espacio, lugar y movimiento pues son bien conocidos para todos»,**[2.3]** eludiendo cualquier intento de describir estos conceptos con rigor o precisión. Sus próximas palabras se han hecho famosas: «El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin referencia a nada externo, permanece siempre homogéneo e inmóvil». Es decir, el espacio absoluto simplemente es, y es para siempre. Punto. Pero hay indicios de que Newton no se sentía cómodo declarando simplemente la existencia e importancia de algo que no se puede ver, medir ni afectar directamente. Escribió:

> Ciertamente es muy difícil descubrir los verdaderos movimientos de los cuerpos individuales y distinguirlos de los movimientos aparentes, porque las partes de ese espacio inmóvil en que los cuerpos se mueven no dejan impresión en los sentidos. **[2.4]**

De modo que Newton nos deja en una posición algo difícil. Pone el espacio absoluto en el centro de la descripción del elemento más básico y esencial de la física —el movimiento— pero deja su definición vaga y reconoce su propia incomodidad por jugarse todo a una carta tan escurridiza. Muchos otros han compartido esta incomodidad.

Space Jam

Einstein dijo una vez que si alguien utiliza palabras como «rojo», «duro» o «decepcionado», todos sabemos básicamente lo que significan. Pero cuando se trata de la palabra «espacio», «cuya relación con la experiencia psicológica es menos directa, existe una gran incertidumbre en la interpretación». [2.5] Esta incertidumbre se remonta a muy atrás: la lucha por entender el significado del espacio es antigua. Demócrito, Epicuro, Lucrecio, Pitágoras, Platón, Aristóteles y muchos de sus seguidores a lo largo de los tiempos lucharon de una manera u otra con el significado de «espacio». ¿Hay una diferencia entre espacio y materia? ¿Tiene el espacio una existencia independiente de la presencia de objetos materiales? ¿Hay algo como un espacio vacío? ¿Son espacio y materia mutuamente excluyentes? ¿Es el espacio finito o infinito?

Durante milenios, las discusiones filosóficas del espacio surgieron a menudo asociadas a disquisiciones teológicas. Dios, según algunos, es omnipresente, una idea que da al espacio un carácter divino. Esta línea de razonamiento fue adelantada por Henry More, un filósofo/teólogo del siglo XVII quien, piensan algunos, pudo haber sido uno de los mentores de Newton. [2.6] More creía que si el espacio estuviera vacío no existiría, pero también argumentó que ésta es una observación irrelevante porque, incluso cuando

está privado de objetos materiales, el espacio está lleno de espíritu, de modo que *nunca* está verdaderamente vacío. El propio Newton adoptó una versión de esta idea, permitiendo que el espacio esté lleno de «sustancia espiritual» tanto como de sustancia material, pero tuvo cuidado en añadir que semejante materia espiritual «no puede ser un obstáculo para el movimiento de la materia; no más que si no hubiera nada en su camino». **[2.7]** El espacio absoluto, declaró Newton, es el sensorio de Dios.

Estas especulaciones filosóficas y religiosas sobre el espacio pueden ser atractivas y provocativas, pero, como en el aleccionador comentario de Einstein, carecen de una precisión descriptiva crítica. Pero de dicho discurso emerge una pregunta fundamental y formulada de forma precisa: ¿deberíamos atribuir una realidad independiente al espacio, como hacemos para otros objetos materiales más corrientes como el libro que usted está sosteniendo ahora, o deberíamos considerar el espacio meramente como un lenguaje para describir relaciones entre objetos materiales ordinarios?

El gran filósofo alemán Gottfried Wilhelm Leibniz, que era contemporáneo de Newton, creía firmemente que el espacio no existe en ningún sentido convencional. Hablar de espacio, afirmaba, no es nada más que una forma fácil y conveniente de codificar dónde unas cosas se relacionan con otras. Sin los objetos en el espacio, decía Leibniz, el propio espacio no tiene significado o existencia independiente. Pensemos en el alfabeto. Proporciona un orden para veintiocho letras —proporciona relaciones tales como *b* viene a continuación de *a*, *d* está seis letras antes de *j*, *x* está tres letras después de *u*, y similares. Pero sin las letras el alfabeto no tiene significado, no tiene una existencia independiente «supraletra». Más bien, el alfabeto nace con las letras cuyas relaciones lexicográficas

suministra. Leibniz afirmaba que lo mismo es cierto para el espacio: el espacio no tiene significado aparte de proporcionar el lenguaje natural para discutir la relación entre la localización de un objeto y la de otro. Según Leibniz, un espacio del que se eliminaran todos los objetos —un espacio completamente vacío— tendría tan poco sentido como un alfabeto al que le faltan sus letras.

Leibniz presentó varios argumentos en apoyo de esta posición denominada *relacionista*. Por ejemplo, argumentó que si el espacio existe realmente como una entidad, como una sustancia de fondo, Dios habría tenido que escoger en qué parte de esta sustancia colocar el universo. Pero ¿cómo podía Dios, cuyas decisiones tienen una justificación profunda y nunca son aleatorias o casuales, haber distinguido una localización de otra dentro del vacío uniforme del espacio, pues todas eran iguales? Para el oído científicamente receptivo, este argumento es muy débil. Sin embargo, si eliminamos el elemento teológico, como hizo el propio Leibniz en otros argumentos que presentó, nos quedamos con cuestiones espinosas: ¿cuál es la localización del universo dentro del espacio? Si el universo se moviera como un todo —dejando intactas todas las posiciones relativas de los objetos materiales— diez metros a la izquierda o a la derecha, ¿cómo lo sabríamos? ¿Cuál es la velocidad del universo entero a través de la sustancia del espacio? Si somos fundamentalmente incapaces de detectar el espacio o cambios dentro del espacio, ¿cómo podemos afirmar que existe realmente?

Es aquí donde Newton intervino con su cubo y cambió drásticamente la naturaleza del debate. Aunque Newton estaba de acuerdo en que ciertas características del espacio absoluto parecen difíciles o quizá imposibles de detectar directamente, él argumentó que la existencia del espacio absoluto tiene consecuencias que son observables: las

aceleraciones, como las que están en juego en el cubo giratorio, son aceleraciones con respecto al espacio absoluto. Así, la forma cóncava del agua, según Newton, es una consecuencia de la existencia del espacio absoluto. Y Newton argumentaba que una vez que se tiene una evidencia sólida a favor de la existencia de algo, por indirecta que sea, eso pone fin a la discusión. En un golpe astuto, Newton desplazó el debate sobre el espacio desde las elucubraciones filosóficas a los datos científicamente verificables. El efecto fue palpable. Con el tiempo Leibniz se vio obligado a admitir, «concedo que hay una diferencia entre el movimiento verdadero absoluto de un cuerpo y un mero cambio relativo de su situación con respecto a otro cuerpo». [2.8] Esto no era una capitulación ante el espacio absoluto de Newton, pero suponía un serio revés para la firme posición relacionista.

Durante los doscientos años siguientes, los argumentos de Leibniz y otros en contra de atribuir al espacio una realidad independiente apenas generaron un eco en la comunidad científica. [2.9] El péndulo se había inclinado claramente hacia la visión del espacio de Newton; sus leyes del movimiento, basadas en su concepto de espacio absoluto, ocuparon el centro del escenario. Ciertamente, el éxito de estas leyes para describir las observaciones era la razón esencial para su aceptación. Sin embargo, es sorprendente señalar que el propio Newton consideraba todos sus logros en física como la mera formación de una base sólida para soportar lo que él consideraba su descubrimiento realmente importante: el espacio absoluto. Para Newton todo se refería al espacio. [2.10]

Mach y el significado del espacio

Cuando era pequeño, solía jugar con mi padre mientras paseábamos por las calles de Manhattan. Uno de nosotros miraba alrededor, fijándose en secreto en algo que estaba sucediendo —un autobús que pasaba, una paloma que se posaba en una ventana, un hombre al que accidentalmente se le caía una moneda— y trataba de describir cómo se vería desde una perspectiva inusual tal como la rueda del autobús, la paloma en vuelo o la moneda cayendo hacia la tierra. El reto consistía en adoptar una descripción poco familiar como «estoy andando sobre una superficie cilíndrica oscura rodeada de paredes bajas y suaves, y del cielo desciende un racimo desordenado de gruesos tentáculos blancos», e imaginar que eso era la visión de una hormiga andando sobre un perrito caliente al que un vendedor callejero le estaba poniendo la salsa. Aunque dejamos de jugar años antes de que yo siguiera mi primer curso de física, el juego tiene en parte la culpa de que yo sintiese cierta desazón cuando me encontré con las leyes de Newton.

El juego animaba a ver el mundo desde diferentes puntos de vista y resaltaba que cada uno de ellos era tan válido como cualquier otro. Pero según Newton, aunque uno es ciertamente libre para contemplar el mundo desde cualquier perspectiva que escoja, los diferentes puntos de vista no están en absoluto en pie de igualdad. Desde el punto de vista de una hormiga en la bota de un patinador sobre hielo son el hielo y la pista de patinaje los que están girando; desde el punto de vista de un espectador en la grada, es el patinador el que está girando. Los dos puntos de vista parecen ser igualmente válidos, parecen estar en pie de igualdad, parecen guardar la relación simétrica de cada sistema giratorio con respecto al otro. Pero según Newton una de estas perspectivas es más correcta que la otra puesto que es *realmente* el patinador el que está

girando, y sus brazos se despegan de su cuerpo, mientras que si es *realmente* la pista la que está girando, sus brazos no se despegarán. Aceptar el espacio absoluto de Newton significaba aceptar un concepto absoluto de aceleración y, en particular, aceptar una respuesta absoluta respecto a quién o qué está girando realmente. Yo me esforzaba por entender cómo podía ser esto cierto. Cada fuente que consultaba —libros de texto y profesores por igual— coincidía en que sólo el movimiento relativo tenía relevancia cuando se considera el movimiento con velocidad constante, de modo que ¿por qué demonios, me preguntaba sin cesar, iba a ser diferente el movimiento acelerado? ¿Por qué no podía ser la aceleración *relativa*, como la velocidad relativa, la única cosa relevante cuando se considera el movimiento con velocidad que no es constante? La existencia del espacio absoluto decretaba lo contrario, pero para mí esto parecía muy peculiar.

Mucho después aprendí que durante los últimos siglos muchos físicos y filósofos —a veces en voz alta, a veces calladamente— habían luchado con la misma cuestión. Aunque el cubo de Newton parecía mostrar definitivamente que el espacio absoluto es lo que selecciona una perspectiva antes que la otra (si alguien o algo está girando con respecto al espacio absoluto, entonces están girando realmente; de lo contrario no lo están), esta solución dejaba insatisfechas a muchas personas que reflexionaban sobre estas cuestiones. Más allá de la sensación intuitiva de que ninguna perspectiva debería ser «más correcta» que las demás, y más allá de la propuesta eminentemente razonable de Leibniz de que sólo el movimiento relativo entre objetos materiales tiene significado, el concepto de espacio absoluto dejaba muchas preguntas acerca de por qué el espacio absoluto puede permitirnos identificar el verdadero movimiento acelerado, como sucede con el cubo,

mientras que no puede proporcionar una manera de identificar el verdadero movimiento con velocidad constante. Después de todo, si el espacio absoluto existe realmente, debería proporcionar una referencia para todo movimiento, no sólo el movimiento acelerado. Si el espacio absoluto existe realmente, ¿por qué no proporciona una manera de identificar dónde estamos situados en un sentido absoluto, una manera que no necesite utilizar nuestra posición con respecto a otros objetos materiales como punto de referencia? Y, si el espacio absoluto existe realmente, ¿cómo puede afectarnos (haciendo que nuestros brazos se despeguen del cuerpo si giramos, por ejemplo) mientras que aparentemente no tenemos ninguna manera de afectarlo?

En los siglos transcurridos desde la obra de Newton estas cuestiones fueron ocasionalmente debatidas, pero sólo a mediados del siglo XIX, cuando el físico y filósofo austríaco Ernst Mach entró en escena, se sugirió un nuevo punto de vista atrevido, profético y extraordinariamente influyente sobre el espacio —una visión que, entre otras cosas, tendría con el tiempo un profundo impacto en Albert Einstein.

Para entender la idea de Mach —o más exactamente, una lectura moderna de ideas que se suelen atribuir a Mach[*2]— volvamos al cubo por un momento. Hay algo extraño en el argumento de Newton. El experimento del cubo nos reta a explicar por qué la superficie del agua es plana en una situación y cóncava en otra. En busca de explicaciones, examinábamos las dos situaciones y nos dábamos cuenta de que la diferencia clave entre ellas era si el agua estaba girando o no. De forma nada sorprendente, tratábamos de explicar la forma de la superficie del agua apelando a su estado de movimiento. Pero aquí está la cuestión: antes de introducir el espacio absoluto, Newton se centró únicamente en el cubo como referencia posible para

determinar el movimiento del agua y, como vimos, este enfoque falla. Sin embargo, hay otras referencias que podríamos utilizar de forma natural para calibrar el movimiento del agua, tal como el laboratorio en el que el experimento tiene lugar —su suelo, su techo y sus paredes —. O si estábamos realizando el experimento en un día soleado a cielo abierto, los edificios o árboles del entorno, o el suelo bajo nuestros pies, proporcionarían la referencia «en reposo» para determinar si el agua estaba girando. Y si resultara que estábamos realizando este experimento flotando en el espacio exterior, acudiríamos a las estrellas distantes para que sirvieran de referencia en reposo.

Esto lleva a la siguiente pregunta. ¿Es posible que Newton dejara de lado el cubo con demasiada facilidad y no reparara en el movimiento relativo que somos capaces de invocar en la vida real, como el movimiento del agua respecto al laboratorio, del agua respecto a la Tierra, o del agua respecto a las estrellas fijas en el cielo? ¿Es posible que tal movimiento relativo pueda explicar la forma de la superficie del agua, eliminando la necesidad de introducir el concepto de espacio absoluto? Ésta era la línea de indagación que planteó Mach en la década de 1870.

Para entender mejor el punto de vista de Mach, imagine que está usted flotando en el espacio exterior, con una sensación de tranquilidad, inmovilidad e ingravidez. Usted mira y puede ver las estrellas lejanas, y también ellas parecen estar perfectamente en reposo. (Es un auténtico momento zen.) Entonces, alguien que se acerca flotando le agarra y le hace girar. Usted notará dos cosas. En primer lugar, sentirá que sus extremidades tienden a despegarse de su cuerpo y usted dejará que se abran. En segundo lugar, cuando usted mire hacia las estrellas, éstas ya no parecerán estacionarias. En su lugar, parecerá que están girando describiendo grandes arcos de círculo a través del

cielo distante. Su experiencia revela así una íntima asociación entre sentir una fuerza sobre su cuerpo y presenciar un movimiento con respecto a las estrellas lejanas. Tenga esto en mente cuando tratemos el experimento de nuevo pero en un ambiente diferente.

Imagine ahora que usted está inmerso en la oscuridad del espacio *completamente* vacío: no hay estrellas, no hay galaxias, no hay planetas, no hay aire, no hay nada salvo una oscuridad total. (Un auténtico instante existencial.) Esta vez, si usted empieza a girar, ¿qué sentirá? ¿Habrá un tirón de sus brazos y piernas hacia afuera? Nuestras experiencias en la vida diaria nos llevan a responder que sí: cada vez que pasamos de no girar (un estado en el que no sentimos nada) a girar, sentimos la diferencia en que nuestras extremidades sufren un tirón hacia afuera. Pero el ejemplo presente es diferente a cualquier cosa que cualquiera de nosotros haya experimentado alguna vez. En el universo tal como lo conocemos hay siempre otros objetos materiales, ya sean vecinos o, cuando menos, muy lejanos (tales como estrellas distantes), que pueden servir como referencia para nuestros diversos estados de movimiento. En este ejemplo, sin embargo, usted no tiene absolutamente ninguna manera de distinguir «no girar» de «girar» mediante comparaciones con otros objetos materiales; no hay ningún otro objeto material. Mach tomó en serio esta observación y dio un paso gigante más allá. Sugirió que en este caso tampoco podría haber ninguna forma de sentir una diferencia entre diversos estados de rotación. Más exactamente, Mach argumentó que en un universo vacío no hay distinción entre girar y no girar —no hay concepto de movimiento o aceleración si no hay puntos de referencia para comparar— y por lo tanto girar y no girar es lo mismo. Si las dos piedras de Newton unidas por una cuerda se pusieran a girar en un universo por lo demás vacío, Mach decía que la cuerda

permanecería flácida. Si usted girase en un universo por lo demás vacío, sus brazos y piernas no se despegarían de su cuerpo, y el fluido de sus oídos no sería afectado; usted no sentiría nada.

Esta es una sugerencia profunda y sutil. Para asimilarla realmente, usted necesita meterse seriamente en el ejemplo e imaginar la quietud uniforme y negra del espacio totalmente vacío. No es como una habitación oscura en la que usted siente el suelo bajo sus pies o en la que sus ojos se adaptan lentamente a la minúscula cantidad de luz que se filtra desde fuera por la puerta o la ventana; ahora estamos imaginando que no hay cosas, de modo que no hay suelo y no hay ninguna luz a la que adaptarse. Independientemente de dónde usted vaya o mire, no sentirá ni verá nada absolutamente. Usted está encerrado en un capullo de oscuridad inmutable, sin ninguna referencia material para comparar. Y sin esa referencia, argumentaba Mach, los propios conceptos de movimiento y aceleración dejan de tener significado. No se trata sólo de que usted no sentiría nada si gira; es mucho más básico. En un universo por lo demás vacío, permanecer perfectamente inmóvil y girar uniformemente son indistinguibles. [*3]

Newton, por supuesto, hubiera discrepado. Él afirmaba que incluso el espacio completamente vacío tiene *espacio*. Y, aunque el espacio no es tangible o directamente asible, Newton argumentaba que aún proporciona un algo con respecto al cual puede decirse que se mueven los objetos materiales. Pero recordemos cómo llegó Newton a esta conclusión: él consideró el movimiento de rotación y *supuso* que los resultados familiares en el laboratorio (la superficie del agua se hace cóncava; Homer se siente presionado contra la pared del cubo; sus brazos se extienden hacia afuera cuando usted gira; la cuerda entre dos piedras en rotación se pone tensa) seguiría siendo verdadero si los

experimentos se realizaran en el espacio vacío. Esta hipótesis le llevó a buscar algo en el espacio vacío con respecto a lo cual pudiera definirse el movimiento, y el algo a lo que llegó era el propio espacio. Mach cuestionó con fuerza la hipótesis clave: argumentó que lo que sucede en el laboratorio no es lo que sucedería en el espacio completamente vacío.

El de Mach fue el primer desafío importante a la obra de Newton en más de dos siglos, y durante años envió ondas de choque a través de la comunidad de la física (y más allá: en 1909, mientras vivía en Londres, Vladimir Lenin escribió un panfleto filosófico que, entre otras cosas, discutía aspectos de la obra de Mach[2.11]). Pero si Mach tenía razón y no había noción de rotación en un espacio por lo demás vacío —un estado de cosas que eliminaría la justificación de Newton para un espacio absoluto— eso aún deja el problema de explicar el experimento del cubo en la Tierra, en el que el agua ciertamente adopta una forma cóncava. Sin apelar al espacio absoluto —si el espacio absoluto no es un algo— ¿cómo explicaría Mach la forma del agua? La respuesta sale de una reflexión sobre una simple objeción al razonamiento de Mach.

Mach, el movimiento y las estrellas

Imagine un universo que no está completamente vacío, como Mach concibió, sino que tiene solamente un puñado de estrellas salpicadas por el cielo. Si usted realiza ahora el experimento de rotación en el espacio exterior, las estrellas —incluso si aparecen como meros alfilerazos de luz que llegan desde una enorme distancia— proporcionan un medio de calibrar su estado de movimiento. Si usted empieza a girar, los puntos distantes de luz parecerán dar vueltas a su

alrededor. Y puesto que las estrellas proporcionan una referencia visual que le permite distinguir rotación de no rotación, usted esperaría ser capaz también de experimentarlo. Pero ¿cómo pueden unas pocas estrellas lejanas suponer tal diferencia, de modo que su presencia o ausencia actúa como un interruptor que enciende o apaga la sensación de girar (o con más generalidad, la sensación de movimiento acelerado)? Si usted puede sentir el movimiento de rotación en un universo con sólo unas pocas estrellas lejanas, quizá eso significa que la idea de Mach es errónea; quizá, como supuso Newton, en un universo vacío usted *seguiría sintiendo* la sensación de giro.

Mach ofreció una respuesta a esta objeción. En un universo vacío, según Mach, usted no siente nada si gira (más exactamente, no hay siquiera un concepto de girar frente a no girar). En el otro extremo del espectro, en un universo poblado por todas las estrellas y los demás objetos materiales existentes en nuestro universo real, la fuerza sobre sus brazos y piernas es la que usted experimenta cuando gira realmente. (Inténtelo.) Y, aquí está la clave, en un universo que no está vacío pero que tiene menos materia que el nuestro, Mach sugería que la fuerza que usted sentiría al girar estaría entre nada y la que sentiría en nuestro universo. Es decir, la fuerza que usted siente es proporcional a la cantidad de materia en el universo. En un universo con una única estrella, usted sentiría una fuerza minúscula sobre su cuerpo si empezara a girar. Con dos estrellas, la fuerza se haría un poco mayor, y así sucesivamente hasta llegar a un universo con el contenido material del nuestro, en el que usted siente toda la fuerza familiar del giro. En este enfoque, la fuerza que usted siente de la aceleración surge como un efecto colectivo, una influencia colectiva del resto de la materia en el universo.

Una vez más, la propuesta vale para todo tipo de movimiento acelerado, no sólo para la rotación. Cuando el avión en el que usted se encuentra está frenando en la pista, cuando el automóvil en el que usted se encuentra se detiene con un chirrido, cuando el ascensor en el que usted se encuentra empieza a subir, las ideas de Mach implican que la fuerza que usted siente representa la influencia combinada del resto de la materia que constituye el universo. Si hubiera más materia, usted sentiría una fuerza mayor. Si hubiera menos materia, sentiría una fuerza menor. Y si no hubiera materia, no sentiría nada en absoluto. Por ello, en la forma de pensar de Mach, sólo cuentan el movimiento relativo y la aceleración relativa. *Usted siente aceleración sólo cuando acelera con respecto a la distribución media del resto del material que hay en el cosmos*. Sin otro material, sin ningún punto de referencia para comparar, Mach afirmaba que no habría manera de experimentar la aceleración.

Para muchos físicos, ésta es una de las propuestas más seductoras sobre el cosmos propuestas durante el último siglo y medio. Generaciones de físicos han encontrado profundamente perturbador imaginar que el intocable, inasible e impalpable tejido del espacio es realmente un algo, un algo suficientemente sustancial para proporcionar la referencia última y absoluta para el movimiento. Para muchos ha parecido absurdo, o al menos científicamente irresponsable, basar una comprensión del movimiento en algo tan imperceptible, tan completamente más allá de nuestros sentidos, que bordea lo místico. Pero estos mismos físicos seguían preguntándose de qué otra manera se podría explicar el cubo de Newton. Las ideas de Mach produjeron excitación porque planteaban la posibilidad de una nueva respuesta, una en la que el espacio no es un algo, una respuesta que apunta de nuevo hacia la concepción

relacionista del espacio defendida por Leibniz. El espacio, en la visión de Mach, es muy parecido a lo que Leibniz imaginaba: es el lenguaje para expresar la relación entre la posición de un objeto y la de otro. Pero, como un alfabeto sin letras, el espacio no goza de una existencia independiente.

Mach frente a Newton

Yo supe de las ideas de Mach cuando era estudiante de licenciatura, y eso fue un regalo del cielo. Aquí, finalmente, había una teoría del espacio y el movimiento que volvía a poner todas las perspectivas en pie de igualdad, puesto que sólo el movimiento relativo y la aceleración relativa tenían significado. A diferencia de la referencia newtoniana para el movimiento —una cosa invisible llamada espacio absoluto— la referencia propuesta por Mach estaba abierta a que todos lo vieran: la materia que está distribuida por todo el cosmos. Yo estaba seguro de que la de Mach tenía que ser la respuesta. También aprendí que yo no era el único que reaccionaba así; estaba siguiendo una larga línea de físicos, Albert Einstein incluido, quien ya había desaparecido cuando ellos encontraron por primera vez las ideas de Mach.

¿Tiene razón Mach? ¿Estaba Newton tan atrapado en el giro de su cubo que llegó a una conclusión descuidada al considerar el espacio? ¿Existe el espacio absoluto de Newton, o se había vuelto a inclinar el péndulo decididamente hacia la perspectiva relacionista? Durante las primeras décadas posteriores a que Mach introdujera sus ideas, estas cuestiones no pudieron ser respondidas. En gran parte, ello era debido a que la sugerencia de Mach no era una teoría o una descripción completa, puesto que él no

especificó nunca la forma en que el contenido de materia del universo podría ejercer la influencia propuesta. Si sus ideas eran correctas, ¿cómo contribuyen las estrellas lejanas y la casa de al lado a su sensación de que usted está girando cuando da vueltas? Sin especificar un mecanismo físico para realizar su propuesta, era difícil investigar con cualquier precisión las ideas de Mach.

Desde nuestro punto de vista moderno, una conjetura razonable es que la gravedad podría tener algo que ver con las influencias implicadas en la sugerencia de Mach. En las décadas siguientes, esta posibilidad captó la atención de Einstein, y él sacó mucha inspiración de la propuesta de Mach mientras desarrollaba su propia teoría de la gravedad, la teoría de la relatividad general. Cuando el polvo que levantó la relatividad se hubo asentado finalmente, la cuestión de si el espacio es un algo —de si es correcto el punto de vista absolutista o el relacionista— se había transformado de una forma que hacía añicos todas las formas anteriores de considerar el universo.

3

La relatividad y lo absoluto

¿Es el espaciotiempo una abstracción einsteiniana o una entidad física

Algunos descubrimientos proporcionan respuestas a preguntas. Otros descubrimientos son tan profundos que arrojan nueva luz sobre las preguntas, demostrando que los misterios anteriores se habían percibido equivocadamente por la falta de conocimiento. Uno podría pasar toda una vida —en la Antigüedad algunos lo hicieron — preguntándose por lo que sucede cuando se llega al borde de la Tierra, o tratando de calcular quién o qué vive en el subsuelo de la Tierra. Pero cuando uno aprende que la Tierra es redonda, ve que los misterios anteriores no están resueltos; en lugar de ello, se han vuelto irrelevantes.

Durante las primeras décadas del siglo XX, Albert Einstein hizo dos profundos descubrimientos. Cada uno de ellos causó un cambio radical en nuestra comprensión del espacio y el tiempo. Einstein desmanteló las estructuras rígidas y absolutas que Newton había erigido, y construyó su propia torre, sintetizando espacio y tiempo de una manera totalmente imprevista. Cuando lo hizo, el tiempo estaba tan fundido con el espacio que la realidad de uno ya no podía ser considerada por separado del otro. Y por eso, en la tercera década del siglo XX la cuestión de la

corporeidad del espacio estaba pasada de moda. En su reformulación einsteiniana, de la que pronto hablaremos, se transformó en: ¿es el *espaciotiempo* un algo? Con esa modificación aparentemente ligera, nuestra comprensión del escenario de la realidad quedó transformada.

¿Está vacío el espacio vacío?

La luz fue el primer actor en el drama de la relatividad escrito por Einstein en los primeros años del siglo XX. Y fue la obra de James Clerk Maxwell la que puso el escenario para las ideas de Einstein. A mediados del siglo XIX, Maxwell descubrió cuatro poderosas ecuaciones que, por primera vez, establecían un marco teórico riguroso para entender la electricidad, el magnetismo y su íntima relación. **[3.1]** Maxwell desarrolló estas ecuaciones estudiando cuidadosamente la obra del físico inglés Michael Faraday, quien a comienzos del siglo XIX había realizado decenas de miles de experimentos que mostraban características hasta entonces desconocidas de la electricidad y el magnetismo. La idea clave de Faraday fue el concepto de campo. Ampliado más tarde por Maxwell y muchos otros, este concepto ha tenido una enorme influencia sobre el desarrollo de la física durante los dos últimos siglos, y subyace a muchos de los pequeños misterios que encontramos en la vida cotidiana. Cuando usted atraviesa los arcos de seguridad del aeropuerto, ¿cómo es posible que una máquina que no le toca pueda determinar si usted lleva objetos metálicos? Cuando usted se somete a una resonancia magnética, ¿cómo es posible que un aparato que permanece fuera de su cuerpo pueda tomar una imagen detallada de su interior? Cuando usted mira una brújula, ¿cómo es posible que la brújula oscile y apunte hacia el

norte incluso si nada parece moverla? La respuesta familiar a la última pregunta apela al campo magnético de la Tierra, y el concepto de campo magnético sirve para explicar también los dos ejemplos anteriores.

Nunca he visto una manera mejor de hacerse una idea intuitiva de un campo magnético que la demostración de la escuela elemental en la que se esparcen limaduras de hierro en la vecindad de un imán. Después de agitarlas un poco, las limaduras de hierro se alinean en una disposición ordenada de arcos que parten del polo norte del imán y se curvan para terminar en el polo sur del imán, como en la figura 3.1. La figura formada por las limaduras de hierro es una prueba directa de que el imán crea un algo invisible que permea el espacio a su alrededor —un algo que puede ejercer, por ejemplo, una fuerza sobre trozos de metal—. El algo invisible es el *campo magnético* y, para nuestra intuición, se parece a una neblina o esencia que puede llenar una región del espacio y ejercer con ello una fuerza más allá de la extensión física del propio imán. Un campo magnético proporciona a un imán lo que un ejército proporciona a un dictador y lo que los auditores proporcionan a Hacienda: influencia más allá de sus fronteras físicas, lo que permite que la fuerza se ejerza en el «campo». Por eso es por lo que un campo magnético se denomina también un campo de fuerza.

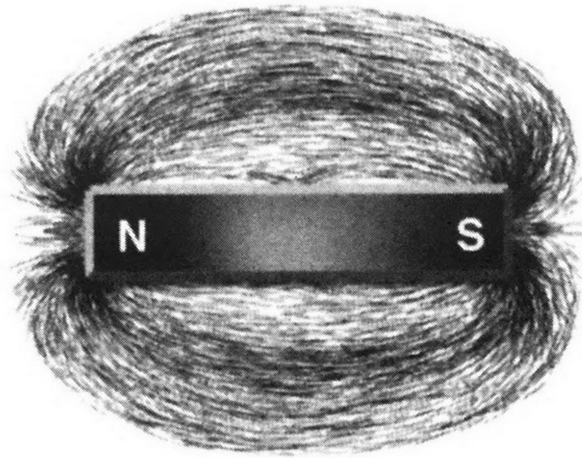


FIGURA 3.1. Limaduras de hierro esparcidas cerca de un imán siguen su campo magnético.

Es la capacidad de los campos magnéticos de penetrar y de llenar el espacio lo que les hace tan útiles. El campo magnético de un detector de metales del aeropuerto se filtra a través de su ropa y hace que los objetos metálicos emitan sus propios campos magnéticos —campos que entonces ejercen una influencia inversa sobre el detector, haciendo que suene su alarma—. El campo magnético de un aparato de resonancia magnética penetra en su cuerpo, haciendo que unos átomos particulares giren en el sentido correcto para generar sus propios campos magnéticos —campos que la máquina puede detectar y decodificar para dar una imagen de los tejidos internos—. El campo magnético de la Tierra penetra en la brújula y hace girar la aguja, haciendo que apunte a lo largo de un arco que, como resultado de procesos geológicos de larga duración, está alineado en una dirección casi norte-sur.

Los campos magnéticos son un tipo familiar de campo, pero Faraday también analizó otro: el *campo eléctrico*. Éste es el campo que hace que salten chispas de su bufanda de

lana, que se cargue su mano cuando usted toca el pomo metálico de una puerta en una habitación con moqueta y que hace que sienta un hormigueo en su piel cuando se encuentra en una montaña durante una tormenta eléctrica. Y si usted examinara una brújula durante una tormenta semejante, la forma en que se desvía la aguja magnética cuando se produce un relámpago cercano le daría un indicio de una profunda interconexión entre los campos eléctricos y magnéticos —algo descubierto por primera vez por el físico danés Hans Oersted e investigado minuciosamente por Faraday mediante laboriosos experimentos—. De la misma forma que la evolución del mercado de valores puede afectar a las acciones que luego pueden afectar a su vez al mercado de valores, y así sucesivamente, estos científicos encontraron que cambios en un campo eléctrico pueden producir cambios en un campo magnético vecino, que entonces puede causar cambios en el campo eléctrico, y así sucesivamente. Maxwell encontró la base matemática para estas interrelaciones, y puesto que sus ecuaciones demostraron que los campos eléctrico y magnético están tan entretejidos como las hebras en los rizos de un rastafari, fueron finalmente bautizados como campos *electromagnéticos*, y la influencia que ejercen como fuerza *electromagnética*.

Hoy estamos inmersos constantemente en un mar de campos electromagnéticos. Su teléfono móvil y la radio de su automóvil funcionan a enormes distancias porque los campos electromagnéticos emitidos por las compañías telefónicas y las estaciones de radio bañan regiones del espacio enormemente amplias. Lo mismo sucede con las conexiones inalámbricas de Internet; los computadores pueden pasearse por toda la World Wide Web gracias a los campos electromagnéticos que están vibrando alrededor de nosotros —y, de hecho, a través de nosotros—. Por

supuesto, en la época de Maxwell, la tecnología electromagnética estaba menos desarrollada, pero entre los científicos su hazaña no fue menos reconocida: mediante el lenguaje de los campos, Maxwell había demostrado que electricidad y magnetismo, aunque inicialmente considerados distintos, son en realidad tan sólo aspectos diferentes de una única entidad física.

Más tarde encontraremos otros tipos de campos — campos gravita-torios, campos nucleares, campos de Higgs, y demás— y se hará cada vez más claro que el concepto de campo es fundamental para nuestra formulación moderna de la ley física. Pero por ahora el siguiente paso crítico en nuestra historia se debe también a Maxwell. Al analizar con más detalle ecuaciones encontró que los cambios o perturbaciones en los campos electromagnéticos viajan de una manera ondulatoria a una velocidad particular: 1.080 millones de kilómetros por hora. Como éste es precisamente el valor que otros experimentos habían encontrado para la velocidad de la luz, Maxwell se dio cuenta de que la luz no debe ser otra cosa que una onda electromagnética, una onda que tiene las propiedades correctas para interaccionar con las sustancias químicas en nuestra retina y damos la sensación de visión. Este logro hizo que los ya trascendentales descubrimientos de Maxwell se hiciesen aún más extraordinarios: él había unido la fuerza producida por imanes, la influencia ejercida por cargas eléctricas y la luz que utilizamos para ver el universo —pero también planteó una cuestión profunda.

Cuando decimos que la velocidad de la luz es de 1.080 millones de kilómetros por hora, la experiencia, y nuestra discusión hasta ahora, nos enseña que éste es un enunciado carente de significado si no especificamos con respecto a qué se está midiendo esta velocidad. Lo divertido era que las ecuaciones de Maxwell daban precisamente este

número, 1.080 millones de kilómetros por hora, sin especificar o basarse aparentemente en ninguna referencia semejante. Era como si alguien diese el lugar de una fiesta a 30 kilómetros al norte sin especificar la referencia, sin especificar al norte de qué. La mayoría de los físicos, Maxwell incluido, intentaron explicar la velocidad que daban sus ecuaciones de la siguiente manera: las ondas familiares, tales como las ondas del océano o las ondas sonoras, son transmitidas por una sustancia, un medio. Las ondas del océano son transmitidas por el agua. Las ondas sonoras son transmitidas por el aire. Y las velocidades de estas ondas están especificadas *con respecto al medio*. Cuando hablamos de la velocidad del sonido a temperatura ambiente de 1.230 kilómetros por hora (también conocida como Mach 1, por el mismo Ernst Mach que encontramos antes) queremos decir que las ondas sonoras viajan a esta velocidad a través del aire que, salvo por esto, está en reposo. Era natural, entonces, que los físicos supusieran que las ondas luminosas —ondas electromagnéticas— también debían viajar a través de un medio particular, un medio que nunca había sido visto o detectado pero que debía existir. Para dar su debido respeto a este algo invisible que transportaba la luz, se le dio un nombre: el *éter luminífero*, o el *éter* para abreviar, siendo este último un término antiguo que utilizó Aristóteles para describir la sustancia mágica comodín de la que se suponía que estaban hechos los cuerpos celestes. Y, para cuadrar esta propuesta con los resultados de Maxwell se sugirió que sus ecuaciones adoptaban implícitamente la perspectiva de alguien en reposo con respecto al éter. Los 1.080 millones de kilómetros por hora a los que llegaban sus ecuaciones eran entonces la velocidad de la luz con respecto al éter en reposo.

Como usted puede ver, hay una similitud sorprendente entre el éter luminífero y el espacio absoluto de Newton. Ambos tenían su origen en intentos de proporcionar una referencia para definir el movimiento; el movimiento acelerado llevó al espacio absoluto, el movimiento de la luz llevó al éter luminífero. De hecho, muchos físicos vieron el éter como una representación terrenal del espíritu divino que Henry More, Newton y otros habían concebido permeando el espacio absoluto. (Newton y otros en su época habían utilizado incluso el término «éter» en sus descripciones del espacio absoluto.) Pero ¿qué es realmente el éter? ¿De qué está hecho? ¿De dónde procede? ¿Existe en todo lugar?

Estas preguntas sobre el éter son las mismas que durante siglos habían sido planteadas acerca del espacio absoluto. Pero mientras que el test machiano para el espacio absoluto implicaba girar en un universo completamente vacío, los físicos fueron capaces de proponer experimentos factibles para determinar si el éter existía realmente. Por ejemplo, si usted nada en el agua hacia una ola que se acerca, la onda se aproxima a usted más rápidamente; si nada alejándose de la ola, ésta se aproxima más lentamente. Análogamente, si usted se mueve a través del supuesto éter hacia o alejándose de una onda luminosa, la aproximación de la onda debería ser, por el mismo razonamiento más rápida o más lenta que 1.080 millones de kilómetros por hora. Sin embargo, en 1887, cuando Albert Michelson y Edward Morley midieron la velocidad de la luz, una y otra vez encontraron exactamente la misma velocidad de 1.080 millones de kilómetros por hora *independientemente de su movimiento o del movimiento de la fuente luminosa*. Se idearon todo tipo de argumentos ingeniosos para explicar estos resultados. Quizá, sugirieron algunos, los experimentadores estaban

arrastrando con ellos inadvertidamente al éter cuando se movían. Quizá, aventuraron unos pocos, el aparato se estaba deformando cuando se movía a través del éter, corrompiendo la medida. Pero no hubo una explicación clara hasta que Einstein tuvo su idea revolucionaria.

Espacio relativo, tiempo relativo

En junio de 1905 Einstein escribió un artículo con el modesto título «Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento», que de una vez por todas sentenció el final del éter luminífero. De un golpe, cambió también para siempre nuestra comprensión del espacio y el tiempo. Einstein desarrolló las ideas del artículo durante un intenso período de cinco semanas entre abril y mayo de 1905, pero las cuestiones a las que finalmente llegó le habían estado preocupando durante toda la década anterior. Cuando era adolescente, Einstein se preguntaba qué aspecto tendría una onda luminosa si uno fuera tras ella exactamente a la velocidad de la luz. Puesto que la onda luminosa y el que la persigue estarían atravesando el éter exactamente a la misma velocidad, el perseguidor se mantendría al paso con la luz. Y por lo tanto, concluía Einstein, desde su perspectiva la luz parecería como si no se estuviera moviendo. Sería posible alcanzarla y atrapar un puñado de luz sin movimiento igual que se puede recoger un puñado de nieve recién caída.

Pero aquí está el problema. Resulta que las ecuaciones de Maxwell no permiten que la luz parezca estacionaria, es decir, verla como si estuviera en reposo. Y ciertamente no hay ningún informe fiable de nadie que realmente haya cogido un trozo estacionario de luz. Entonces, se

preguntaba el adolescente Einstein, ¿qué vamos a hacer con esta aparente paradoja?

Diez años más tarde, Einstein dio al mundo su respuesta con su teoría de la relatividad especial. Ha habido mucho debate sobre las raíces intelectuales del descubrimiento de Einstein, pero no hay duda de que su inquebrantable creencia en la simplicidad jugó un papel crítico. Einstein era consciente al menos de algunos experimentos que habían fracasado en detectar la existencia del éter. [3.2] Así que, ¿por qué dar vueltas tratando de encontrar fallos en los experimentos? En lugar de ello, declaró Einstein, adoptemos el enfoque más simple: los experimentos estaban fracasando en encontrar el éter porque no hay éter. Y puesto que las ecuaciones de Maxwell que describen el movimiento de la luz —el movimiento de las ondas electromagnéticas— no invocan ningún medio semejante, experimento y teoría convergían en la misma conclusión: la luz, a diferencia de cualquier otro tipo de onda encontrada, no necesita un medio que la transmita. La luz es un viajero solitario. La luz puede viajar a través del espacio vacío.

Pero ¿qué vamos a hacer entonces con las ecuaciones de Maxwell que dan a la luz una velocidad de 1.080 millones de kilómetros por hora? Si no hay éter que proporcione el patrón de reposo, ¿qué es el eso con respecto al cual hay que interpretar esta velocidad? Una vez más, Einstein desafió la convención y respondió con una radical simplicidad. Si la teoría de Maxwell no apela a ningún patrón de reposo particular, la interpretación más directa es que no necesitamos uno. La velocidad de la luz, declaró Einstein, *es de 1.080 millones de kilómetros por hora con respecto a nada y a todo*.

Bien, éste es ciertamente un enunciado simple; encaja con una máxima a menudo atribuida a Einstein: «Hacer todo tan simple como sea posible, pero no más». El problema es

que también parece descabellada. Si usted corre detrás de un rayo de luz, el sentido común dicta que, desde su perspectiva, la velocidad de la luz tiene que ser menor que 1.080 millones de kilómetros por hora. Si usted corre hacia un rayo de luz que se aproxima, el sentido común dicta que, desde su perspectiva, la velocidad de la luz que se aproxima será mayor que 1.080 millones de kilómetros por hora. Durante toda su vida, Einstein desafió el sentido común, y esta vez no fue una excepción. Argumentó vigorosamente que, independientemente de lo rápido que se mueva hacia o alejándose de un rayo de luz, usted siempre medirá que su velocidad es de 1.080 millones de kilómetros por hora —no un poco más rápida, no un poco más lenta, no importa qué—. Esto resolvería ciertamente la paradoja que le desconcertaba cuando era adolescente: la teoría de Maxwell no permite luz en reposo porque la luz nunca está en reposo; independientemente de cuál sea su estado de movimiento, ya persiga usted a un rayo de luz, o se aleje de él, o simplemente se quede quieto, la luz conserva una velocidad fija y siempre constante de 1.080 millones de kilómetros por hora. Pero es natural preguntar: ¿cómo puede la luz comportarse de una manera tan extraña?

Pensemos en la velocidad por un momento. La velocidad se mide por cuánto ha recorrido algo dividido por el tiempo que ha tardado en llegar allí. Es una medida de espacio (la distancia recorrida) dividida por una medida de tiempo (la duración del viaje). Desde Newton, el espacio se había considerado absoluto, como algo que está ahí fuera, como algo que existe «sin referencia a nada externo». Por consiguiente, las medidas de espacio y las separaciones espaciales deben ser también absolutas: independientemente de quién mida la distancia entre dos cosas en el espacio, si las medidas se hacen con el cuidado debido, las respuestas siempre coincidirán. Y aunque

todavía no lo hemos discutido directamente, Newton afirmó que lo mismo es cierto del tiempo. Su descripción del tiempo en los *Principia* refleja el lenguaje que utilizó para el espacio: «El tiempo existe en sí mismo y por su propia naturaleza, y fluye uniformemente, sin referencia a nada externo». En otras palabras, según Newton, hay un concepto absoluto y universal de tiempo que se aplica en todo lugar y en cualquier instante. En un universo newtoniano, independientemente de quién mida cuánto tiempo tarda algo en suceder, si las medidas se hacen con precisión, las respuestas coincidirán siempre.

Estas hipótesis sobre el espado y el tiempo están de acuerdo con nuestras experiencias cotidianas y por esa razón son la base para nuestra conclusión de sentido común de que la luz debería parecer viajar más lentamente si corremos tras ella. Para verlo, imaginemos que Bart, quien acaba de recibir un nuevo monopatín impulsado por energía nuclear, decide aceptar el reto definitivo y echar una carrera con un rayo de luz. Aunque él está algo decepcionado al ver que la velocidad máxima de la tabla es sólo de 800 millones de kilómetros por hora, él está decidido a intentarlo. Su hermana Lisa permanece quieta con un láser; cuenta hacia atrás desde 11 (el número favorito de su héroe Schopenhauer) y cuando llega a cero Bart y la luz del láser salen disparados. ¿Qué ve Lisa? Bien, por cada hora que pasa, Lisa ve que la luz recorre 1.080 millones de kilómetros mientras que Bart recorre sólo 800 millones de kilómetros, de modo que Lisa deduce correctamente que la luz se está adelantando a Bart a 280 millones de kilómetros por hora. Traigamos ahora a Newton a esta historia. Sus ideas dictaminan que las observaciones de Lisa sobre el espacio y el tiempo son absolutas y universales en el sentido de que cualquier otro que realizara estas medidas obtendría las mismas respuestas. Para Newton, tales hechos sobre el

movimiento a través de espacio y tiempo eran tan objetivos como 2 + 2 son igual a 4. Por eso, según Newton, Bart estaría de acuerdo con Lisa e informaría que el rayo de luz iba por delante de él a 280 millones de kilómetros por hora.

Pero cuando Bart regresa, no está de acuerdo en absoluto. Por el contrario, afirma con desaliento que hiciera lo que hiciese —por mucho que forzase el monopatín— veía que la luz se le escapaba a 1.080 millones de kilómetros por hora, ni un kilómetro menos. [3.3] Y si, por alguna razón, usted no confía en Bart, tenga en cuenta que miles de experimentos meticulosos realizados durante los últimos cien años, que han medido la velocidad de la luz utilizando fuentes y receptores en movimiento, apoyan con precisión sus observaciones.

¿Cómo puede ser esto?

Einstein lo investigó, y la respuesta que encontró es una extensión lógica pero profunda de la discusión que hemos llevado hasta ahora. Debe ocurrir que las medidas de distancias y duraciones que hace Bart, los datos de entrada que utiliza para calcular con qué rapidez se aleja la luz de él, son diferentes de las medidas de Lisa. Pensemos en ello. Puesto que la velocidad no es otra cosa que distancia dividida por tiempo, no hay otro modo de que Bart haya encontrado una respuesta diferente de la de Lisa para la rapidez con la que la luz le está dejando atrás. Por lo tanto, concluía Einstein, las ideas de Newton de espacio absoluto y tiempo absoluto eran erróneas. Einstein se dio cuenta de que los experimentadores que se están moviendo uno con respecto a otro, como Bart y Lisa, no encontrarán valores idénticos para medidas de distancias y duraciones. Los enigmáticos datos experimentales sobre la velocidad de la luz sólo pueden explicarse si sus percepciones de espacio y tiempo son diferentes.

Sutil pero no malicioso

La relatividad del espacio y el tiempo es una conclusión sorprendente. Yo la he conocido hace más de veinticinco años, pero incluso así, cada vez que me siento tranquilamente y pienso en ello, me quedo asombrado. A partir del enunciado de que la velocidad de la luz es constante, deducimos que *espacio y tiempo están en el ojo del que contempla*. Cada uno de nosotros lleva su propio reloj, su propio monitor del paso del tiempo. Cada reloj es igualmente preciso, pero cuando nos movemos uno con respecto a otro, estos relojes no coinciden. Pierden su sincronización; miden cantidades diferentes de tiempo transcurrido entre dos sucesos escogidos. Lo mismo es cierto de la distancia. Cada uno de nosotros lleva su propia regla, su propio monitor de distancia en el espacio. Cada regla es igualmente precisa, pero cuando nos movemos uno con respecto a otro, estas reglas no coinciden; miden distancias diferentes entre las localizaciones de dos sucesos especificados. Si el espacio y el tiempo no se comportaran de esta manera, la velocidad de la luz no sería constante y dependería del estado de movimiento del observador. Pero es constante; espacio y tiempo sí se comportan de esta manera. Espacio y tiempo se ajustan de una manera que se compensa exactamente, de modo que las observaciones de la velocidad de la luz den el mismo resultado, independientemente de la velocidad del observador.

Obtener los detalles cualitativos de cómo difieren exactamente las medidas de espacio y tiempo es más complicado, pero solamente requiere el álgebra de la escuela secundaria. No es la profundidad de las matemáticas la que hace desafiante la relatividad especial de Einstein sino el grado en que las ideas son extrañas y aparentemente incompatibles con nuestras experiencias

cotidianas. Pero una vez que Einstein tuvo la intuición clave —la idea de que necesitaba romper con la perspectiva newtoniana de más de doscientos años sobre el espacio y el tiempo— no fue difícil completar los detalles. Él fue capaz de demostrar exactamente cómo deben diferir las medidas de distancias y duraciones que hace una persona de las que hace otra para garantizar que cada una de ellas mide un valor idéntico para la velocidad de la luz. [3.4]

Para hacerse una idea más completa de lo que encontró Einstein, imagine que Bart, a regañadientes, ha puesto el limitador obligado de su monopatín, que ahora tiene una velocidad máxima de 100 kilómetros por hora. Si él se dirige hacia el norte a la máxima velocidad —leyendo, silbando, bostezando y ocasionalmente mirando la carretera— y luego sale a una autopista que apunta en dirección hacia el nordeste, su velocidad en la dirección norte será menor que 100 kilómetros por hora. La razón es clara. Inicialmente, toda su velocidad iba destinada al movimiento hacia el norte, pero cuando cambió de dirección parte de esa velocidad se desvió al movimiento hacia el este, dejando un poco menos en dirección norte. Esta idea extraordinariamente simple nos permite captar la idea clave de la relatividad especial. He aquí cómo:

Estamos acostumbrados al hecho de que los objetos pueden moverse a través del espacio, pero hay otro tipo de movimiento que es igualmente importante: los objetos también se mueven a través del tiempo. Precisamente ahora, el reloj de su muñeca y el reloj de la pared están en marcha, demostrando que usted y todo lo que le rodea están moviéndose implacablemente a través del tiempo, moviéndose implacablemente de un segundo al siguiente y al siguiente. Newton pensaba que el movimiento a través del tiempo era completamente independiente del movimiento a través del espacio; pensaba que estos dos

tipos de movimiento no tenían nada que ver uno con otro. Pero Einstein encontró que están íntimamente ligados. De hecho, el descubrimiento revolucionario de la relatividad especial es éste: cuando usted mira algo como un automóvil aparcado, que desde su punto de vista está en reposo —es decir, no está en movimiento a través del espacio— todo su movimiento es a través del tiempo. El automóvil, su conductor, la calle, usted, su ropa, todo se está moviendo a través del tiempo en perfecta sincronía: segundo tras segundo, marchando uniformemente. Pero si el automóvil se pone en marcha, parte de su movimiento a través del tiempo se desvía a movimiento a través del espacio. E igual que la velocidad de Bart hacia el norte se reducía cuando él desviaba algo de su movimiento hacia el norte a movimiento hacia el este, la velocidad del automóvil a través del tiempo se reduce cuando desvía algo de su movimiento a través del tiempo a movimiento a través del espacio. Esto significa que el avance del automóvil a través del tiempo se frena y por lo tanto *el tiempo discurre más lentamente para el automóvil en movimiento y su conductor de lo que discurre para usted y todo lo demás que permanece en reposo*.

Eso, en pocas palabras, es la relatividad especial. De hecho, podemos ser un poco más precisos y llevar la descripción un paso más lejos. Debido al limitador Bart no tiene otra elección que limitar su velocidad a 100 kilómetros por hora. Esto es importante para la historia, puesto que si él hubiera acelerado lo suficiente cuando dobla hacia el nordeste, podría haber compensado la desviación de velocidad y con ello mantenido la misma velocidad neta hacia el norte. Pero con el limitador, por mucho que él revolucione el motor de su monopatín, su velocidad total —la combinación de su velocidad hacia el norte y su velocidad hacia el este— permanecía fija en el máximo de 100

kilómetros por hora. Y por eso, cuando él cambió su dirección un poco hacia el este, necesariamente provocó una disminución de la velocidad hacia el norte.

La relatividad especial dicta una ley similar para todo movimiento: *la velocidad combinada del movimiento de cualquier objeto a través del espacio y su movimiento a través del tiempo es siempre exactamente igual a la velocidad de la luz*. Al principio es fácil que usted retroceda ante este enunciado puesto que todos estamos acostumbrados a que nada salvo la luz puede viajar a la velocidad de la luz. *Pero esa idea familiar se refiere únicamente al movimiento a través del espacio*. Ahora estamos hablando de algo relacionado, pero más rico: el movimiento combinado de un objeto a través del espacio y el tiempo. El hecho clave, descubrió Einstein, es que estos dos tipos de movimiento son siempre complementarios. Cuando el automóvil aparcado que usted está observando se pone en marcha, lo que realmente sucede es que algo de su movimiento a velocidad de la luz se desvía de movimiento a través del tiempo a movimiento a través del espacio, manteniendo invariable su total combinado. Tal desviación significa incuestionablemente que el movimiento del automóvil a través del tiempo se frena.

Como ejemplo, si Lisa hubiera sido capaz de ver el reloj de Bart cuando él iba a 800 millones de kilómetros por hora, habría visto que dicho reloj marchaba a dos tercios de la velocidad del suyo. Por cada tres horas que pasaran en el reloj de Lisa, ella vería que sólo pasaban dos en el de Bart. Su movimiento rápido a través del espacio habría mostrado una pérdida importante de su velocidad a través del tiempo.

Además, la velocidad máxima a través del espacio se alcanza cuando todo el movimiento a velocidad de la luz a través del tiempo se desvía completamente a movimiento a velocidad de la luz a través del espacio —una manera de

entender por qué es imposible ir a través del espacio a velocidad mayor que la luz—. La luz, que siempre viaja a la velocidad de la luz a través del espacio, es especial en cuanto que siempre alcanza tal desviación total. E igual que conducir hacia el este no deja movimiento para viajar al norte, moverse a velocidad de la luz a través del espacio no deja movimiento para moverse a través del tiempo. El tiempo se para cuando se viaja a velocidad de la luz a través del espacio. Un reloj llevado por una partícula de luz no marcharía en absoluto. La luz realiza los sueños de Ponce de León y la industria cosmética: no envejece. [3.5]

Como queda claro en esta descripción, los efectos de la relatividad especial son más pronunciados cuando las velocidades (a través del espacio) son una fracción significativa de la velocidad de la luz. Pero la naturaleza complementaria, y poco familiar, del movimiento a través del espacio y el tiempo siempre es válida. Cuanto menor es la velocidad, más pequeña es la desviación de la física prerelativista —es decir, del sentido común— pero la desviación sigue existiendo, por supuesto.

Realmente. Esto no es un juego de manos o una ilusión psicológica. Así es como trabaja el universo.

En 1971, Joseph Hafele y Richard Keating colocaron relojes atómicos de haces de cesio a bordo de un avión comercial de Pan Am que dio la vuelta al mundo. Cuando compararon los relojes del avión con relojes idénticos que habían quedado en reposo en el suelo, encontraron que había transcurrido menos tiempo en los relojes en movimiento. La diferencia era minúscula —unas pocas cienmilésimas de millonésima de segundo— pero estaba exactamente en acuerdo con los descubrimientos de Einstein. Es difícil tener algo más claro que esto.

En 1921, se empezó a difundir el rumor de que experimentos más recientes y más refinados estaban

encontrando evidencia a favor del éter. [3.6] Si hubiera sido así, habría significado que había un patrón absoluto de reposo y que la relatividad especial de Einstein era errónea. Al oír este rumor, Einstein respondió: «El Señor es sutil, pero no malicioso». Escudriñar meticulosamente el funcionamiento de la Naturaleza para extraer intuiciones sobre el espacio y el tiempo era un profundo desafío, un desafío que había exigido lo mejor de cualquiera hasta Einstein. Pero permitir que exista esa teoría sorprendente y bella, y pese a todo hacerla irrelevante para el funcionamiento del universo, eso sería malicioso. Einstein no lo creía; descartó los nuevos experimentos. Su confianza estaba justificada. Finalmente se demostró que los experimentos estaban equivocados y el éter luminífero se evaporó del discurso científico.

Pero ¿qué pasa con el cubo?

Ésta es ciertamente una historia ordenada para la luz. Teoría y experimento coinciden en que la luz no necesita ningún medio que transporte sus ondas y en que, independientemente del movimiento de la fuente de luz o de la persona que observa, su velocidad es fija e invariable. Todos los puntos de vista están en pie de igualdad con todos los demás. No hay ningún patrón de reposo absoluto o preferido. Perfecto. Pero ¿qué pasa con el cubo?

Recordemos que aunque muchos veían el éter luminífero como la sustancia física que daba credibilidad al espacio absoluto de Newton, no era ésa la razón por la que Newton introdujo el espacio absoluto. La verdadera razón era que, después de bregar con el movimiento acelerado tal como el del cubo en rotación, Newton no vio otra opción que apelar a algún ente de fondo invisible con respecto al cual podría

definirse el movimiento sin ambigüedad. Prescindir del éter no significaba prescindir del cubo, de modo que ¿cómo trataron la cuestión Einstein y su teoría de la relatividad especial?

Bien, a decir verdad, en la relatividad especial el interés principal de Einstein estaba en un tipo de movimiento especial: el movimiento a velocidad constante. Sólo en 1915, unos diez años más tarde, afrontó plenamente el movimiento acelerado más general en su teoría de la relatividad general. Incluso así, Einstein y otros consideraron repetidamente la cuestión del movimiento de rotación utilizando las ideas de la relatividad especial; y concluyeron, como Newton y a diferencia de Mach, que incluso en un universo por lo demás completamente vacío usted sentiría el tirón hacia fuera de la rotación —Homer se sentiría presionado contra la pared interior de un cubo en rotación; la cuerda entre las dos piedras giratorias se tensaría—. [3.7] Tras haber desmantelado el espacio absoluto y el tiempo absoluto de Einstein, ¿cómo explica esto Einstein?

La respuesta es sorprendente. A pesar de su nombre, la teoría de Einstein no afirma que todo es relativo. La relatividad especial afirma que algunas cosas son relativas: las velocidades son relativas; las distancias a través del espacio son relativas; las duraciones de tiempo transcurrido son relativas. Pero la teoría introduce en realidad un nuevo y gran concepto absoluto: el *espaciotiempo absoluto*. El espacio-tiempo absoluto es tan absoluto para la relatividad especial como el espacio absoluto y el tiempo absoluto lo eran para Newton, y en parte por esta razón Einstein no sugirió ni le gustaba particularmente el nombre «teoría de la relatividad». En su lugar, él y otros físicos sugirieron *teoría de invariancia*, resaltando que la teoría, en esencia, implica algo en lo que todo el mundo está de acuerdo, algo que no es relativo. [3.8]

El espaciotiempo absoluto es el siguiente capítulo vital en la historia del cubo, porque, incluso si está privado de todos los puntos de referencia materiales para definir el movimiento, el espaciotiempo absoluto de la relatividad especial proporciona un algo con respecto al cual puede decirse que se aceleran los objetos.

Cortando espacio y tiempo

Para ver esto, imaginemos que Marge y Lisa, buscando alguna cualidad del tiempo, se apuntan a un curso de extensión sobre renovación urbana en el Instituto Bums. Como primera tarea, se les pide que vuelvan a diseñar el trazado de calles y avenidas de Springfield, sometido a dos requisitos: primero, la malla de calles/avenidas debe estar configurada de modo que el monumento al Hongo Nuclear esté localizado exactamente en el centro de la malla, en el cruce de la calle Cinco y la Quinta Avenida, y segundo, el diseño debe utilizar calles de cien metros de largo, y avenidas, perpendiculares a las calles, que también sean de cien metros de largo. Inmediatamente antes de la clase, Marge y Lisa comparan sus planos y se dan cuenta de que algo está terriblemente equivocado. Tras configurar adecuadamente su malla de modo que el monumento esté en el centro, Margie encuentra que Kwik-E-Mart está en el cruce de la calle Ocho y la Quinta Avenida, y la central de energía nuclear está en el cruce de la calle Tres y la Quinta Avenida, como se muestra en la figura 3.2a. Pero en el plano de Lisa, las direcciones son completamente diferentes: el Kwik-E-Mart está cerca de la esquina de la calle Siete y la Tercera Avenida, mientras que la central está en la calle Cuatro y la Séptima Avenida, como en la figura 3.2b. Evidentemente, alguien ha cometido un error.

Sin embargo, tras un momento de reflexión, Lisa se da cuenta de lo que pasa. No hay errores. Tanto ella como Marge tienen razón. Simplemente escogieron orientaciones diferentes para sus mallas de calles y avenidas. Las calles y avenidas de Marge corren a un ángulo con respecto a las de Lisa; sus mallas están rotadas una respecto a otra; han seccionado Springfield en calles y avenidas de dos maneras diferentes (ver Fig. 3.2c). La lección aquí es simple pero importante. Hay libertad en la forma de organizar Springfield —una región del espacio— en calles y avenidas. No hay calles «absolutas» ni avenidas «absolutas». La elección de Marge es tan válida como la de Lisa —o, para el caso, como cualquier otra orientación posible.

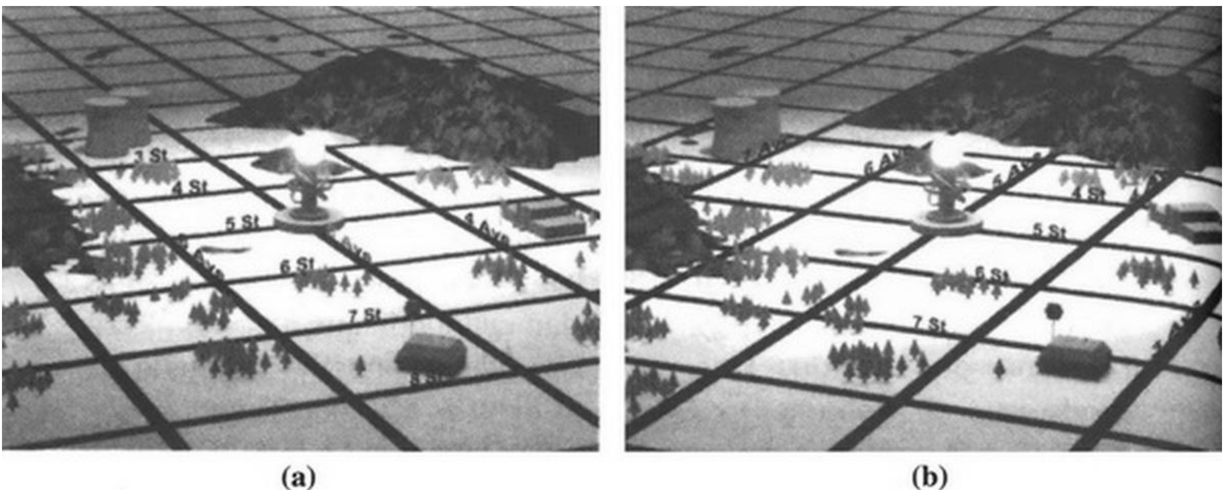


FIGURA 3.2. (**a**) Diseño de calles de Marge, (**b**) Diseño de calles de Lisa.

Tengamos esta idea en mente al introducir el tiempo en la imagen. Estamos acostumbrados a pensar en el espacio como el escenario del universo, pero los procesos físicos ocurren en una región del espacio *durante un intervalo de tiempo*. Como ejemplo, imaginemos que Itchy y Scratchy se están batiendo en duelo, como se ilustra en la figura 3.3a, y

los sucesos se registran momento a momento, como en uno de esos libros antiguos de imágenes fijas que dan la sensación de movimiento cuando las páginas se pasan rápidamente. Cada página es una «rebanada temporal» —como un fotograma en una película— que muestra lo que sucedió en una región del espacio en un instante de tiempo. Para ver lo que sucedió en un instante de tiempo diferente, usted salta a una página diferente. [*4] (Por supuesto, el espacio es tridimensional mientras que las páginas son bidimensionales, pero obviemos esta simplificación por comodidad de pensamiento y para dibujar las figuras. No afectará a ninguna de nuestras conclusiones.) A modo de terminología, una región de espacio considerada durante un intervalo de tiempo se denomina una región de *espaciotiempo*; usted puede considerar una región de espaciotiempo como un registro de todas las cosas que suceden en una región del espacio durante una extensión particular de tiempo.

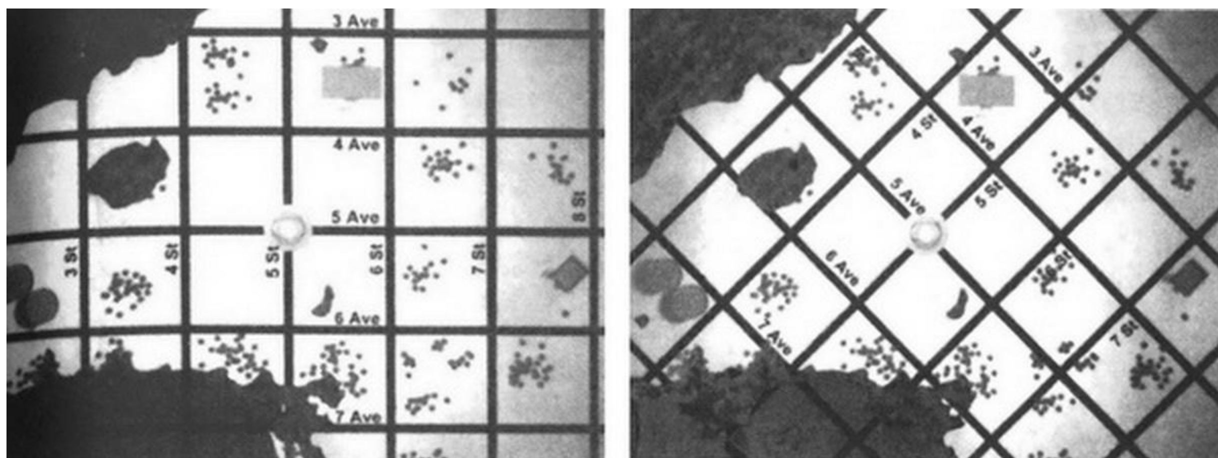


FIGURA 3.2. (**c**) Visión de conjunto de los diseños de calles/avenidas de Marge y de Lisa. Sus mallas difieren por una rotación.

Ahora, siguiendo la idea del profesor de matemáticas de Einstein, Hermann Minkowski (que en una ocasión calificó a su joven estudiante de perro perezoso), consideremos la región del espaciotiempo como una entidad en sí misma: consideremos el libro completo como un objeto por sí mismo. Para hacerlo, imaginemos que, como en la figura 3.3b, ampliamos la encuadernación del libro de imágenes fijas y luego imaginemos que, como en la figura 3.3c, todas las páginas son completamente transparentes, de modo que cuando usted mira el libro ve un bloque continuo que contiene todos los sucesos que sucedieron durante un intervalo de tiempo dado. Desde esta perspectiva, las páginas deberían considerarse como algo que simplemente proporciona una forma conveniente de organizar el contenido del bloque —es decir, de organizar los sucesos del espaciotiempo—.

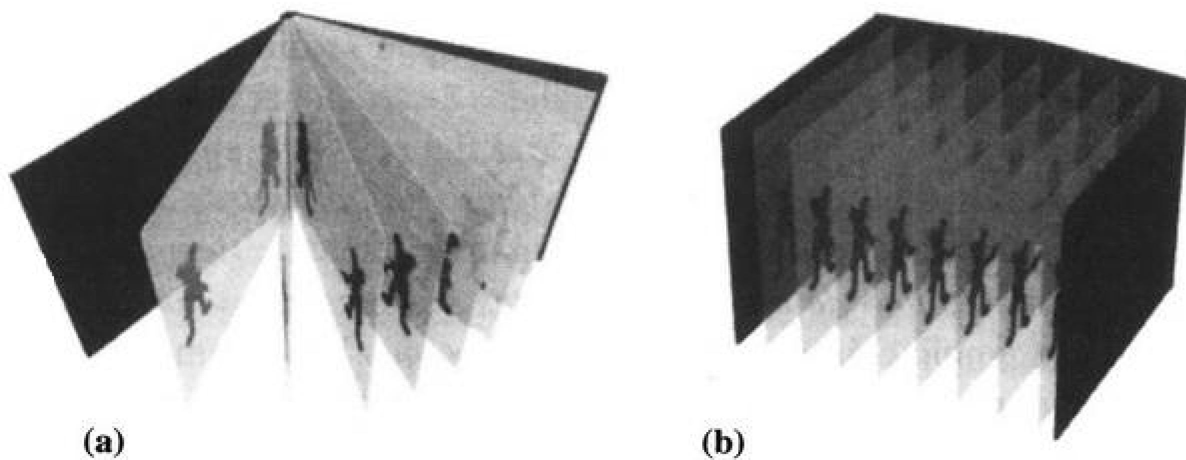


FIGURA 3.3. (**a**) Libro de imágenes fijas del duelo, (**b**) Libro de imágenes fijas con el lomo ampliado.

De la misma forma que una malla de calles/avenidas nos permite especificar fácilmente lugares en una ciudad, dando la dirección de su calle y avenida, la división del bloque

espaciotemporal en páginas nos permite especificar fácilmente un suceso (Itchy disparando su pistola, Scratchy siendo herido, y así sucesivamente) dando el tiempo en el que ocurrió el suceso —la página en la que aparece— y la localización dentro de la región del espacio mostrada en las páginas.

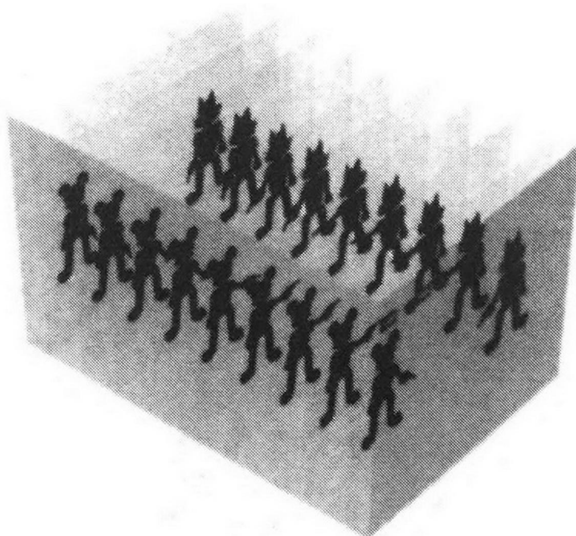


Figura 3.3. (**c**) Bloque de espaciotiempo que contiene el duelo. Las páginas, o «rebanadas de tiempo», organizan los sucesos en el bloque. Los espacios entre rebanadas se muestran sólo por claridad visual; no pretenden sugerir que el tiempo sea discreto, una cuestión que discutimos más tarde.

Éste es el punto clave: de la misma forma que Lisa se dio cuenta de que hay diferentes maneras igualmente válidas de seccionar una región del espacio en calles y avenidas, Einstein se dio cuenta de que hay diferentes maneras igualmente válidas de seccionar una región del espaciotiempo —un bloque como el de la figura 3.3c— en regiones de espacio en instantes de tiempo. *Las páginas en las figuras 3.3a, b y c* —donde, de nuevo, cada página denota un instante de *tiempo— proporcionan sólo uno de*

los muchos cortes posibles. Esto puede sonar como una ampliación menor de lo que sabemos intuitivamente sobre el espacio, pero es la base para superar alguna de las intuiciones más básicas que hemos mantenido durante miles de años. Hasta 1905 se pensaba que todo el mundo experimenta el paso del tiempo de forma idéntica, que todo el mundo coincide en qué sucesos ocurren en un instante de tiempo dado, y por ello, que todo el mundo coincidiría en lo que pertenece a una página dada en el libro del espaciotiempo. Pero cuando Einstein comprendió que dos observadores en movimiento relativo tienen relojes que marchan de forma diferente, todo esto cambió. Relojes que se están moviendo unos con respecto a otros pierden la sincronización y por lo tanto dan nociones diferentes de simultaneidad. Cada página en la figura 3.3b no es sino la visión de un observador de los sucesos en el espacio que tienen lugar en un instante dado de su tiempo. Otro observador, en movimiento con respecto al primero, declarará que no todos los sucesos en una sola de estas páginas suceden al mismo tiempo.

Esto se conoce como la *relatividad de la simultaneidad*, y podemos verlo directamente. Imaginemos que Itchy y Scratchy, pistolas en mano, se enfrentan ahora uno a otro desde extremos opuestos de un largo vagón en movimiento, con un juez en el tren y otro que oficia desde el andén. Para hacer el duelo lo más justo posible, todas las partes han acordado olvidar la regla de los tres pasos y, en su lugar, los duelistas dispararán cuando explote un pequeño montón de pólvora colocado a mitad de camino entre ellos. El primer árbitro, Apu, enciende la mecha, toma un sorbo de su refrescante Chutney Squishee, y retrocede. La pólvora se inflama, y ambos, Itchy y Scratchy, apuntan y disparan. Puesto que Itchy y Scratchy están a la misma distancia de la pólvora, Apu está seguro de que la luz de la llamarada les

llega simultáneamente, de modo que él levanta la bandera verde y declara un duelo limpio. Pero el segundo árbitro, Martin, que estaba observando desde el andén, gritará juego sucio, afirmando que Itchy vio la señal luminosa de la explosión antes que Scratchy. Él explica que puesto que el tren se estaba moviendo hacia delante, Itchy se estaba dirigiendo hacia la luz mientras que Scratchy se alejaba de ella. Esto significa que la luz no tenía que viajar tanto para llegar a Itchy, puesto que éste se movía acercándose a ella; más aún, la luz tenía que viajar más lejos para llegar a Scratchy, puesto que éste se alejaba de ella. Puesto que la velocidad de la luz, moviéndose a izquierda o derecha desde cualquier perspectiva, es constante, Martin afirma que la luz necesitó más tiempo para llegar a Scratchy puesto que tuvo que viajar más, lo que hace el duelo injusto.

¿Quién tiene razón, Apu o Martin? La respuesta inesperada de Einstein es que ambos la tienen. Aunque las conclusiones de nuestros dos árbitros difieren, las observaciones y el razonamiento de cada uno de ellos no tienen fallo. Como el bate y la bola de béisbol, ellos simplemente tienen perspectivas diferentes de la misma secuencia de sucesos. Lo que Einstein puso de manifiesto es que sus diferentes perspectivas generan afirmaciones diferentes pero igualmente válidas de qué sucesos suceden al mismo tiempo. Por supuesto, a las velocidades cotidianas como la del tren, la disparidad es pequeña —Martin afirma que Scratchy vio la luz menos de una billonésima de segundo después de Itchy— pero si el tren se estuviera moviendo más rápido, casi a la velocidad de la luz, la diferencia temporal sería sustancial.

Pensemos en lo que esto significa para las páginas del libro que seccionan una región del espaciotiempo. Puesto que los observadores que se mueven uno con respecto a

otro no están de acuerdo en qué cosas suceden simultáneamente, la forma en que cada uno de ellos seccionará un bloque de espaciotiempo en páginas —cada una de las cuales contiene todos los sucesos que suceden en un instante dado, desde la perspectiva de cada espectador— tampoco estará de acuerdo. En su lugar, los observadores que se mueven uno con respecto a otro, seccionarán un bloque del espaciotiempo en páginas, en rebanadas de tiempo, de maneras diferentes pero igualmente válidas. Einstein encontró para el espacio tiempo lo que Lisa y Mage encontraron para el espacio.

Inclinando las rebanadas

La analogía entre mallas calle/avenida y rebanadas de tiempo puede llevarse aún más lejos. De la misma forma que los planos de Mage y Lisa difieren por una rotación, las rebanadas de tiempo de Apu y Martin, sus páginas de libro también difieren por una rotación, pero una rotación que implica tanto a espacio como a tiempo. Esto se ilustra en las figuras 3.4a y 3.4b, en las que vemos que las rebanadas de Martin están rotadas con respecto a las de Apu, lo que le lleva a concluir que el duelo no es limpio. Una diferencia de detalle crítica, no obstante, es que mientras el ángulo de rotación entre los esquemas de Marge y Lisa se debía a una mera elección de los planos, el ángulo de rotación entre las rebanadas de Apu y Martin está determinado por su velocidad relativa. Con mínimo esfuerzo podemos ver por qué.

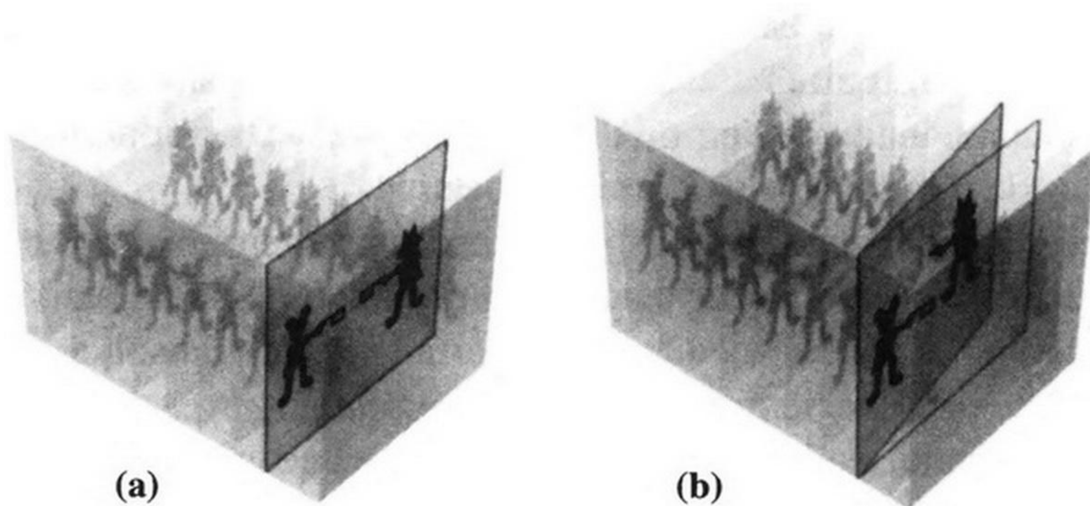


FIGURA 3.4. Rebanadas de tiempo según (**a**) Apu y (**b**) Martin, que están en movimiento relativo. Sus rebanadas difieren por una rotación en el espacio y el tiempo. Según Apu, que está en el tren, el duelo es justo; según Martin, que está en el andén, no lo es. Ambos puntos de vista son igualmente válidos. En (**b**) se resalta el ángulo diferente en que están sus rebanadas del espacio-tiempo.

Imaginemos que Itchy y Scratchy se han reconciliado. En lugar de tratar de dispararse uno a otro, sólo quieren asegurar que los relojes que hay en la parte delantera y la parte trasera del tren están perfectamente sincronizados. Puesto que ellos siguen estando a la misma distancia de la pólvora, urden el siguiente plan. Acuerdan poner sus relojes en hora al mediodía justo cuando vean la luz de la pólvora inflamada. Desde su perspectiva, la luz tiene que viajar la misma distancia para llegar a cada uno de ellos y, puesto que la velocidad de la luz es constante, les llegará simultáneamente. Pero, por la misma razón que antes, Martin y cualquier otro que mire desde el andén dirá que Itchy se dirige hacia la luz emitida mientras que Scratchy se está alejando de ella, y por eso Itchy recibirá la señal luminosa un poco antes que Scratchy. Los observadores del

andén concluirán así que Itchy puso su reloj a las 12.00 antes que Scratchy y por lo tanto afirmarán que el reloj de Itchy está un poco adelantado con respecto al de Scratchy. Por ejemplo, para un observador en el andén como Martin, cuando son las 12.06 en el reloj de Itchy, pueden ser sólo las 12.04 en el de Scratchy (los números exactos dependen de la longitud y la velocidad del tren; cuanto más largo sea y más rápido vaya, mayor es la discrepancia). Pero desde el punto de vista de Apu y de cualquiera que vaya en el tren, Itchy y Scratchy realizaron la sincronización perfectamente. Una vez más, aunque es difícil de aceptarlo visceralmente, no hay aquí paradoja: *los observadores en movimiento relativo no están de acuerdo en la simultaneidad, no están de acuerdo en qué cosas suceden al mismo tiempo*.

Esto significa que una página del libro tal como se ve desde la perspectiva de los que están en el tren, una página que contiene sucesos que consideran simultáneos —tales como la puesta en hora de los relojes de Itchy y Scratchy— contiene sucesos que están en páginas *diferentes* desde la perspectiva de los que observan desde el andén (según los observadores del andén, Itchy puso en hora su reloj antes que Scratchy, de modo que estos dos sucesos están en diferentes páginas desde la perspectiva del observador del andén). Y ahí lo tenemos. Una misma página desde la perspectiva de quienes están en el tren contiene sucesos que están en páginas anteriores y páginas posteriores de un observador en el andén. Por esto es por lo que las rebanadas de Martin y Apu en la figura 3.4 están rotadas unas respecto a otras: lo que es una única rebanada de tiempo desde una perspectiva corta muchas rebanadas de tiempo desde la otra perspectiva.

Si la idea de Newton de espacio absoluto y tiempo absoluto fuera correcta, todos estarían de acuerdo en un único rebanamiento del espaciotiempo. Cada rebanada

representaría el espacio absoluto visto en un instante dado de tiempo absoluto. Sin embargo, no es así como funciona el mundo, y el cambio desde el tiempo newtoniano rígido a la flexibilidad einsteiniana recién descubierta inspira un cambio en nuestra metáfora. Más que ver el espaciotiempo como un libro rígido, a veces será útil considerarlo como una barra de pan enorme y recién hecha. En lugar de las páginas fijas que constituyen un libro —las rebanadas de tiempo newtoniano fijas— consideraremos la variedad de ángulos en los que uno puede cortar una barra en rebanadas de pan paralelas, como en la figura 3.5a. Cada rebanada de pan representa el espacio en un instante de tiempo desde la perspectiva de un observador. Pero como se ilustra en la figura 3.5b, otro observador, en movimiento con respecto al primero, cortará la barra de espaciotiempo a un ángulo diferente. Cuanto mayor es la velocidad relativa de los dos observadores mayor es el ángulo entre sus respectivos cortes paralelos (como se explica en las notas finales, la velocidad límite impuesta por la luz se traduce en un ángulo máximo de rotación de 45° para estos cortes)[3.9] y mayor es la discrepancia entre lo que los observadores informarán que ha sucedido en el mismo instante.

El cubo, según la relatividad especial

La relatividad de tiempo y espacio requiere un tiempo drástico en nuestro pensamiento. Pese a todo, hay un punto importante, antes mencionado y ahora ilustrado por la barra de pan, que a menudo se pasa por alto: *no todo en relatividad es relativo*. Incluso si usted y yo imagináramos que se rebana una barra de pan de dos maneras diferentes, hay algo en lo que estaríamos plenamente de acuerdo: la totalidad de la propia barra. Aunque nuestras rebanadas

difiriesen, si yo imaginara que junto todas mis rebanadas y usted imaginara que hace lo mismo con todas sus rebanadas, los dos reconstruiríamos la misma barra de pan. ¿Cómo podría ser de otra manera? Se supone que ambos cortamos la misma barra.

Análogamente, la totalidad de todas las rebanadas de espacio en instantes sucesivos de tiempo, desde la perspectiva de cualquier único observador (ver figura 3.4), da colectivamente la misma región de espaciotiempo. Diferentes observadores rebanan una región de espacio-tiempo de diferentes maneras, pero la región misma, como la barra de pan, tiene una existencia independiente. Así, aunque Newton estaba decididamente equivocado, su intuición de que había algo absoluto, algo en lo que todos estarían de acuerdo, no fue completamente descartada por la relatividad especial. El espacio absoluto no existe. El tiempo absoluto no existe. Pero según la relatividad especial, el espaciotiempo absoluto sí existe. Con esta observación, revisitemos una vez más el cubo.

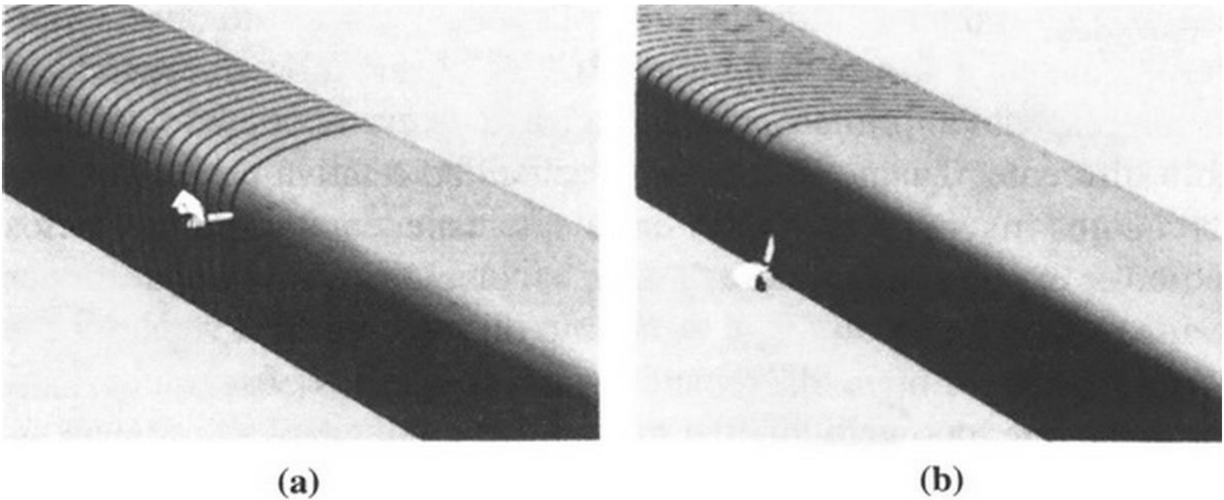


FIGURA 3.5. De la misma forma que una barra de pan puede ser rebanada a ángulos diferentes, un bloque de espaciotiempo es «rebanado temporalmente» a ángulos diferentes por observadores en movimiento relativo. Cuanto mayor es la velocidad relativa, mayor es el ángulo (con un ángulo máximo de 45° correspondiente a la velocidad máxima fijada por la luz).

En un universo por lo demás vacío, ¿con respecto a qué está girando el cubo? Según Newton, la respuesta es el espacio absoluto. Según Mach, no hay ningún sentido siquiera en el que se pueda decir que el cubo gira. Según la relatividad especial de Einstein, la respuesta es el espaciotiempo absoluto.

Para entender esto, consideremos de nuevo los trazados de calles y avenidas propuestos para Springfield. Recordemos que Marge y Lisa discrepaban sobre la dirección de la calle y avenida del Kwik-E-Mart y de la central nuclear porque sus mallas estaban rotadas una respecto a otra. Incluso así, independientemente de cómo escoja la malla cada una de ellas, hay algunas cosas en las que decididamente seguirán de acuerdo. Por ejemplo, si con el fin de incrementar el rendimiento de los trabajadores

durante la hora de comer, se pinta una raya en el suelo que va directamente desde la central nuclear hasta el Kwik-E-Mart, Marge y Lisa no estarán de acuerdo en las calles y avenidas por las que pasa la raya, como usted puede ver en la figura 3.6, pero sí seguirán de acuerdo en la forma de la raya: estarán de acuerdo en que es una línea recta. La forma geométrica de la raya pintada es independiente de la malla calles/avenidas concreta que cada una esté utilizando.

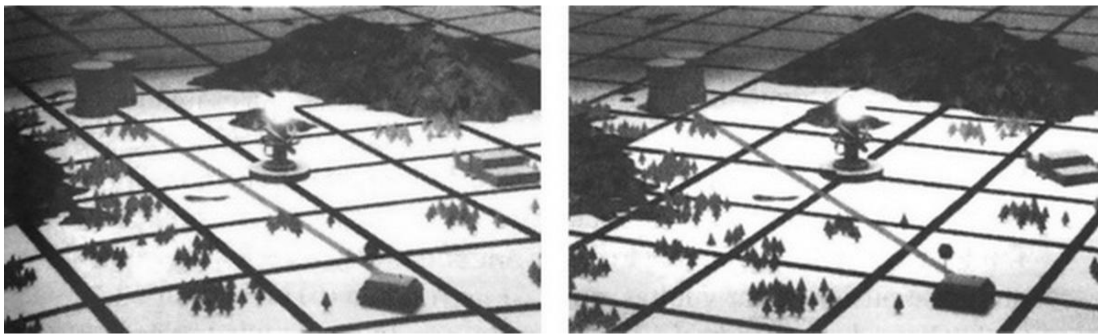


FIGURA 3.6. Independientemente de qué malla de calles se utilice, todos están de acuerdo en la forma de un sendero, en este caso una línea recta.

Einstein se dio cuenta de que algo similar es válido para el espaciotiempo. Incluso si dos observadores en movimiento relativo rebanan el espaciotiempo de maneras diferentes, hay cosas en las que siguen de acuerdo. Como un primer ejemplo, consideremos una línea recta no sólo a través del espacio, sino a través del espaciotiempo. Aunque la inclusión del tiempo hace que dicha trayectoria sea menos familiar, un momento de reflexión revela su significado. Para que la trayectoria de un objeto a través del espaciotiempo sea recta, el objeto no sólo debe moverse en una línea recta a través del espacio, sino que su movimiento también debe ser uniforme a través del tiempo; es decir, tanto su velocidad como su dirección deben ser invariables,

y por ello debe moverse con velocidad constante. Ahora bien, incluso si diferentes observadores rebanan la barra del espaciotiempo a ángulos diferentes y por ello no coincidirán en cuánto tiempo ha transcurrido o cuánta distancia se ha cubierto entre varios puntos de una trayectoria, dichos observadores seguirán de acuerdo, como Marge y Lisa, en si una trayectoria a través del espaciotiempo es una línea recta. Del mismo modo que la forma geométrica de la raya pintada hasta el Kwik-E-Mart es independiente del corte calles/avenidas que uno utilice, también las formas geométricas de las trayectorias en el espaciotiempo son independientes del corte temporal que uno utilice. **[3.10]**

Ésta es una idea simple pero crucial, porque con ella la relatividad especial proporcionó un criterio absoluto —uno en el que todos los observadores coincidirían, independientemente de sus velocidades relativas constantes— para decidir si algo se está acelerando o no. Si la trayectoria que sigue un objeto a través del espaciotiempo es una línea recta, como la del astronauta en reposo (a) en la figura 3.7, no se está acelerando. Si la trayectoria que sigue un objeto tiene cualquier otra forma diferente de una línea recta a través del espacio, se está acelerando. Por ejemplo, ¿si el astronauta encendiera su equipo de propulsión y se pusiera a dar vueltas, como el astronauta (b) en la figura 3.7, o si saliera disparado hacia el espacio profundo a velocidad cada vez mayor, como el astronauta (c), ¿su trayectoria a través del espacio-tiempo sería curva (el signo revelador de la aceleración)? Y así, con estos desarrollos aprendemos que *las formas geométricas de las trayectorias en el espaciotiempo proporcionan el patrón absoluto que determina si algo se está acelerando*. El espaciotiempo, no el espacio solo, proporciona la referencia.

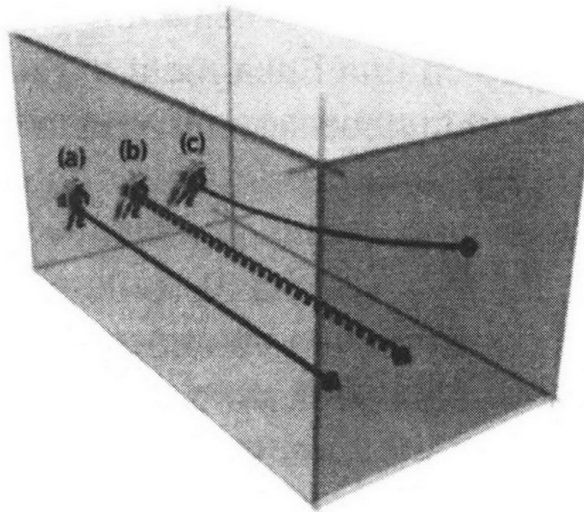


FIGURA 3.7. Caminos a través del espaciotiempo seguidos por tres astronautas. El astronauta (a) no está acelerado y por ello sigue una línea recta a través del espaciotiempo. El astronauta (b) describe círculos repetidamente, y por eso sigue una espiral en el espaciotiempo. El astronauta (c) acelera en el espacio profundo, y por eso sigue otra trayectoria curva en el espacio.

En este sentido, la relatividad especial nos dice que el propio espaciotiempo es el árbitro último del movimiento acelerado. El espacio-tiempo proporciona el telón de fondo con respecto al cual puede decirse que algo, como un cubo en rotación, se acelera incluso en un universo por lo demás vacío. Con esta idea, el péndulo hizo una nueva oscilación: de Leibniz el relacionista había pasado a Newton el absolutista, luego a Mach el relacionista, y ahora pasaba de nuevo a Einstein, cuya relatividad especial demostraba una vez más que el escenario de la realidad —visto como espaciotiempo, no como espacio— es suficiente para ofrecer la referencia definitiva para el movimiento. **[3.11]**

La Gravedad y la Antigua Pregunta

En este momento usted podría pensar que hemos llegado al final de la historia del cubo, con las ideas de Mach desacreditadas y con la victoria de la radical actualización por parte de Einstein de los conceptos absolutos de espacio y tiempo de Newton. La verdad, sin embargo, es más sutil y más interesante. Pero si para usted son nuevas las ideas que hemos cubierto hasta ahora, quizá necesite una pausa antes de seguir hacia las últimas secciones de este capítulo. En la tabla 3.1 encontrará un resumen para refrescar su memoria cuando esté listo para reemprender la marcha.

Muy bien. Si usted está leyendo estas palabras, deduzco que está listo para el siguiente paso importante en la historia del espaciotiempo, un paso catalizado en gran medida por no otro que Ernst Mach. Aunque la relatividad especial, a diferencia de la teoría de Mach, concluye que incluso en un universo por lo demás vacío usted se sentiría presionado contra la pared interior de un cubo en rotación y que la cuerda atada entre las dos piedras que giran se tensaría, Einstein seguía profundamente fascinado por las ideas de Mach. No obstante, comprendió que una seria consideración de estas ideas requería ampliarlas de forma significativa. Mach nunca especificó realmente un mecanismo mediante el que las estrellas lejanas y el resto de la materia en el universo pudiera desempeñar un papel en la fuerza que hace que se abran sus brazos cuando usted gira o con la que se siente presionado contra la pared interior de un cubo en rotación. Einstein empezó a sospechar que si hubiera un mecanismo semejante podría tener algo que ver con la gravedad.

TABLA 3.1. Sumario de varias posiciones naturales en el espacio y espacio- tiempo

Newton	El espacio es una entidad; el movimiento acelerado no es relativo; posición absolutista.
Leibniz	El espacio no es una entidad; todos los aspectos del movimiento son relativos; posición relacionista.
Mach	El espacio no es una entidad; el movimiento acelerado es relativo a la distribución media de masa en el universo; posición relacionista.
Einstein (relatividad especial)	Espacio y tiempo son relativos individualmente; el espacio tiempo es una entidad absoluta

Esta idea tenía un aliciente particular para Einstein, porque en la relatividad especial, con el fin de mantener el análisis en un nivel tratable, había ignorado por completo la gravedad. Quizá, pensó, una teoría más robusta, que englobara la relatividad especial y la gravedad, llegaría a una conclusión diferente respecto a las ideas de Mach. Quizá, supuso, una generalización de la relatividad especial que incorporara la gravedad mostraría que la materia, tanto próxima como lejana, determina la fuerza que sentimos cuando aceleramos.

Einstein también tenía una segunda razón, algo más apremiante, para volver su atención hacia la gravedad. Comprendió que la relatividad especial, con su lema central de que la velocidad de la luz es la velocidad más rápida con la que cualquier objeto o cualquier perturbación puede viajar, estaba en conflicto directo con la ley de la gravitación universal de Newton, ese logro incomparable que durante más de doscientos años había predicho con fantástica precisión el movimiento de la Luna, los planetas, los cometas y todas las cosas lanzadas hacia el cielo. Independientemente del éxito experimental de la ley de

Newton, Einstein se dio cuenta de que, según Newton, la gravedad ejerce su influencia de un lugar a otro, del Sol a la Tierra, de la Tierra a la Luna, de aquí a allí, instantáneamente, sin que transcurra ningún tiempo, *mucho más rápida que la luz*, y eso contradecía directamente la relatividad especial.

Para ilustrar esta contradicción, imagine que usted ha tenido una tarde realmente decepcionante (ha perdido el club de baloncesto de su ciudad, nadie recordó su cumpleaños, alguien se comió el último trozo de Velveeta) y necesita estar solo algún tiempo, así que se lleva el velero de la familia para pasar una noche relajada a bordo. La Luna está sobre su cabeza y hay marea alta (es la atracción gravitatoria de la Luna sobre las masas de agua la que crea las mareas), y en la superficie ondulada del agua danzan bellos reflejos de luz. Pero entonces, como si su noche no hubiera sido ya lo bastante irritante, unos alienígenas hostiles acaban con la Luna y la envían al otro lado de la galaxia. Por supuesto, la repentina desaparición de la Luna sería extraña, pero si la ley de la gravedad de Newton fuera correcta el episodio mostraría algo aún más extraño. La ley de Newton predice que la marea alta empezaría a retirarse debido a la pérdida del tirón gravitatorio de la Luna, aproximadamente un segundo y medio antes de que usted viera que la Luna desaparecía del cielo. *Como un corredor de velocidad que sale antes del pistoletazo, el agua parecería retirarse un segundo y medio demasiado pronto*.

La razón es que, según Newton, en el mismo momento en que la Luna desaparece su tirón gravitatorio desaparecería también *instantáneamente*, y sin la gravedad de la Luna las mareas empezarían a disminuir inmediatamente. Pero, puesto que la luz necesita un segundo y medio para recorrer los casi 400.000 kilómetros entre la Luna y la Tierra, usted no vería inmediatamente que

la Luna había desaparecido; durante un segundo y medio parecería que las mareas estaban retrocediendo de una Luna que seguía brillando en lo alto como de la forma habitual. Así pues, según el enfoque de Newton, la gravedad puede afectarnos antes que la luz —la gravedad puede superar a la luz— y esto, Einstein estaba seguro, era erróneo. [3.12]

Y así, en 1907 Einstein llegó a obsesionarse con la idea de formular una nueva teoría de la gravedad, una que fuera al menos tan precisa como la de Newton pero que no estuviera en conflicto con la teoría de la relatividad especial. Ésta resultó ser un desafío mayor que todos los demás. El formidable intelecto de Einstein había encontrado finalmente la horma de su zapato. Su cuaderno de este período está lleno de ideas a medio formular, propuestas en las que pequeños errores daban como resultado largas divagaciones por caminos espúreos, y exclamaciones de que había resuelto el problema sólo para darse cuenta inmediatamente después de que había cometido otro error. Finalmente, en 1915, Einstein salió a la luz. Aunque Einstein tuvo ayuda en momentos críticos, muy en particular del matemático Marcel Grossman, el descubrimiento de la *relatividad general* fue la rara lucha heroica de una única mente por dominar el universo. El resultado es la joya de la corona de la física precuántica.

El viaje de Einstein hacia la relatividad general empezó con una pregunta clave que Newton, con cierta vergüenza, había dejado de lado dos siglos antes. ¿Cómo ejerce la gravedad su influencia a través de enormes extensiones de espacio? ¿Cómo afecta el Sol, que está a tan enorme distancia, al movimiento de la Tierra? El Sol no toca a la Tierra, de modo que ¿cómo lo hace? En resumen, ¿cómo hace la gravedad su trabajo? Aunque Newton descubrió una ecuación que describía el efecto de la gravedad con gran

precisión, él reconocía abiertamente que había dejado sin responder la pregunta importante de cómo actúa realmente la gravedad. En sus *Principia* Newton escribió: «Dejo este problema a la consideración del lector». **[3.13]** Como usted puede ver, hay una similitud entre este problema y el que Faraday y Maxwell resolvieron en el siglo XIX, utilizando la idea de un campo magnético, concerniente a la forma en que un imán ejerce su influencia sobre objetos con los que no está literalmente en contacto. Así que se podría sugerir una respuesta similar: la gravedad ejerce su influencia mediante otro campo, el campo gravitatorio. Y, hablando en términos generales, ésta es la sugerencia correcta. Pero formular esta respuesta de una manera que no entre en conflicto con la relatividad especial es algo más fácil de decir que de hacer.

Mucho más fácil. Fue a esta tarea a la que el propio Einstein se dedicó con arrojo, y con el marco deslumbrante que forjó tras cerca de una década de búsqueda en la oscuridad, Einstein destronó a la reverenciada teoría de la gravedad de Newton. Y lo que es igualmente deslumbrante, la historia cierra el círculo porque la idea clave de Einstein estaba firmemente ligada a la cuestión que Newton ilustró con el cubo: ¿cuál es la verdadera naturaleza del movimiento acelerado?

La equivalencia entre gravedad y aceleración

En la relatividad especial, Einstein se centraba principalmente en los observadores que se movían con velocidad constante —observadores que no sienten movimiento y por eso están justificados para afirmar que están en reposo y que es el resto del mundo el que se mueve—. Itchy, Scratchy y Apu, que van en el tren, no

sienten ningún movimiento. Desde su perspectiva, es Martin y todos los demás en el andén los que se están moviendo. Martin tampoco siente ningún movimiento. Para él, es el tren y sus pasajeros los que están en movimiento. Ninguna de las dos perspectivas es más correcta que la otra. Pero el movimiento acelerado es diferente, porque uno puede sentirlo. Usted se siente presionado contra el asiento de un automóvil cuando acelera, se siente empujado de lado cuando un tren da una curva cerrada, se siente presionado contra el suelo de un ascensor que acelera hacia arriba.

De todas formas, las fuerzas que usted siente resultaban muy familiares para Einstein. Cuando usted se acerca a una curva cerrada, por ejemplo, pone su cuerpo rígido preparándose para aguantar el empuje lateral, porque la fuerza es inevitable. No hay ninguna manera de protegerse frente a su acción. La única manera de evitar la fuerza es cambiar de plan y no tomar la curva. Esto llamó la atención de Einstein. Él reconoció que esto mismo es lo que caracteriza a la fuerza gravitatoria. Si usted está de pie en el planeta Tierra, está sujeto a la atracción gravitatoria del planeta Tierra. Es inevitable. No hay escape. Aunque usted puede protegerse de las fuerzas electromagnéticas y nucleares, no hay ninguna manera de protegerse frente a la gravedad. Y un día de 1907 Einstein comprendió que ésta no era una mera analogía. En uno de esos destellos de intuición que los científicos esperan durante toda una vida, Einstein comprendió que gravedad y movimiento acelerado son dos caras de la misma moneda.

De la misma forma que al cambiar su movimiento planeado (para evitar la aceleración) usted puede evitar el sentirse presionado contra el asiento de su automóvil o sentirse empujado de lado en el tren, Einstein comprendió que cambiando adecuadamente su movimiento usted también puede evitar las sensaciones normales asociadas

con la atracción de la gravedad. La idea es maravillosamente simple. Para entenderla, imagine que Barney está tratando desesperadamente de ganar la Copa Springfield, una competición de un mes de duración entre todos los hombres de cintura generosa para ver quién puede adelgazar el mayor número de centímetros. Pero al cabo de dos semanas de dieta líquida (Cerveza Duff), cuando su tripa todavía no le deja ver la balanza del cuarto de baño, pierde toda esperanza. Y así, en un ataque de frustración, salta desde la ventana del cuarto de baño con la balanza pegada a sus pies. En su caída, inmediatamente antes de sumergirse en la piscina de su vecino, Barney mira la escala de la balanza ¿y qué ve? Bien, Einstein fue la primera persona en comprender, y comprender plenamente, que Barney verá que la escala de la balanza marca cero. La balanza cae exactamente a la misma velocidad que Barney, de modo que sus pies no presionan contra ella. *En caída libre, Barney experimenta la misma ingravidez que los astronautas experimentan en el espacio exterior*.

De hecho, si imaginamos que Barney salta de su ventana a un gran pozo del que se ha evacuado todo el aire, entonces en su caída no sólo estaría eliminada la resistencia del aire, sino que, debido a que cada átomo de su cuerpo estaría cayendo a exactamente la misma velocidad, todas las tensiones habituales del cuerpo —sus pies presionando contra sus zapatillas, sus piernas presionando en sus pantalones, sus brazos colgando de sus hombros— estarían también eliminadas. **[3.14]** Al cerrar los ojos durante el descenso, Barney sentiría exactamente lo que sentiría si estuviera flotando en la oscuridad del espacio profundo. (Y por si usted es más feliz con ejemplos no humanos: si deja caer dos piedras unidas por una cuerda en el pozo vaciado, la cuerda permanecerá flácida, como lo haría si las piedras estuvieran flotando en el espacio exterior.) Así pues,

cambiando su estado de movimiento —«abandonándose plenamente a la gravedad»— Barney es capaz de simular un ambiente libre de gravedad. (De hecho, para habituar a los astronautas al ambiente libre de gravedad del espacio exterior, la NASA les lleva en un avión 707 modificado, apodado el *Cometa Vómito*, que periódicamente entra en un estado de caída libre hacia la Tierra.)

De forma análoga, mediante un cambio adecuado en el movimiento usted puede crear una fuerza que es esencialmente idéntica a la gravedad. Por ejemplo, imagine que Barney se une a los astronautas que flotan ingrávidos en su cápsula espacial, con la balanza de baño aún pegada a sus pies y aún marcando cero. Si la cápsula encendiera sus cohetes y acelerase, las cosas cambiarían significativamente. Barney se sentiría presionado contra el suelo de la cápsula, igual que usted se siente presionado contra el suelo de un ascensor que se acelera hacia arriba. Y puesto que los pies de Barney están ahora presionando contra la balanza, la escala ya no marca cero. Si el capitán enciende los cohetes en el instante correcto, la escala de la balanza marcará exactamente lo que Barney veía en el cuarto de baño. Gracias a una aceleración adecuada, Barney está ahora experimentando una fuerza que es indistinguible de la gravedad.

Lo mismo es cierto para otros tipos de movimiento acelerado. Si Barney se uniera a Homer en el cubo en el espacio exterior, y, cuando el cubo gira, estuviese perpendicular a Homer, pies y balanza contra la pared interior del cubo, la balanza registraría una lectura distinta de cero puesto que sus pies presionarían contra ella. Si el cubo gira a la velocidad correcta, la balanza dará la misma lectura que Barney encontró antes en el cuarto de baño: la aceleración del cubo giratorio también puede simular la gravedad de la Tierra.

Todo esto llevó a Einstein a concluir que la fuerza que uno siente de la gravedad y la fuerza que uno siente de la aceleración son la misma. Son equivalentes. Einstein llamó a esto el *principio de equivalencia*.

Echemos una mirada a lo que significa. Precisamente ahora usted siente la influencia de la gravedad. Si está de pie, sus pies sienten el suelo que soporta su peso. Si está sentado, siente el apoyo en alguna otra parte, y a menos que esté leyendo en un avión o en un automóvil también es probable que piense que está en reposo —que no está acelerando o ni siquiera moviéndose—. Pero según Einstein usted está realmente acelerando. Puesto que usted sigue estando sentado, esto suena algo estúpido, pero no olvide hacer la pregunta habitual: ¿acelerando con respecto a qué?, ¿acelerando desde qué punto de vista?

Con la relatividad especial Einstein afirmó que el espaciotiempo absoluto proporciona la referencia. Pero la relatividad especial no tiene en cuenta la gravedad. Luego, mediante el principio de equivalencia, Einstein proporcionó una referencia más robusta que incluye los efectos de la gravedad. Y esto entrañaba un radical cambio de perspectiva. *Puesto que la gravedad y la aceleración son equivalentes, si usted siente la influencia de la gravedad debe estar acelerando*. Einstein argumentó que sólo aquellos observadores que no sienten ninguna fuerza en absoluto —incluyendo la fuerza de la gravedad— están justificados cuando declaran que no están acelerando. Dichos observadores libres de fuerzas proporcionan los verdaderos puntos de referencia para discutir el movimiento, y es este reconocimiento el que requiere un cambio importante en nuestra forma de considerar estas cosas. Cuando Barney salta de su ventana hacia el espacio evacuado, le describiríamos normalmente diciendo que está acelerando hacia la superficie de la Tierra. Pero Einstein no

estaría de acuerdo con esta descripción. Según Einstein Barney no está acelerando. *Él* no siente ninguna fuerza. *Él* está ingrávido. *Él* se siente como si estuviera flotando en la profunda oscuridad del espacio vacío. *Él* proporciona el patrón frente al que debe compararse todo movimiento. Y en esta comparación, cuando usted está leyendo tranquilamente en casa, está acelerando. Desde la perspectiva de Barney en su caída libre desde la ventana —la perspectiva, según Einstein, de una verdadera referencia para el movimiento— usted y la Tierra y todos los demás objetos que normalmente consideramos en reposo están *acelerando hacia arriba*. Einstein diría que era la cabeza de Newton la que se elevó para tropezar con la manzana, y no al revés.

Evidentemente, ésta es una manera radicalmente diferente de pensar en el movimiento. Pero está anclada en el simple reconocimiento de que usted siente solo la influencia de la gravedad cuando se resiste a ella. Por el contrario, cuando usted se abandona completamente a la gravedad no la siente. Suponiendo que no esté sometido a ninguna otra influencia (tal como la resistencia del aire), cuando se abandona a la gravedad y se deja caer libremente usted siente lo que sentiría si estuviera flotando libremente en el espacio vacío —una perspectiva que, sin ninguna duda, consideramos que no está acelerada.

En resumen, sólo cuando esos individuos que están flotando libremente, independientemente de si están en las profundidades del espacio exterior o en curso de chocar con la superficie de la Tierra, están justificados para afirmar que no están experimentando aceleración. Si usted pasa frente a un observador semejante y hay aceleración relativa entre ustedes dos, entonces, según Einstein, usted está acelerando.

De hecho, notemos que ni Itchy, ni Scratchy, ni Apu, ni Martin, estaban verdaderamente justificados para decir que él estaba en reposo durante el duelo, puesto que todos ellos sentían la atracción hacia abajo de la gravedad. Esto no afecta a nuestra discusión anterior, porque entonces estábamos interesados sólo en el movimiento horizontal, movimiento que no estaba afectado por la gravedad vertical experimentada por todos los participantes. Pero una cuestión de principio importante es que el vínculo que Einstein encontró entre gravedad y aceleración significa, una vez más, que sólo estamos justificados para considerar en reposo a aquellos observadores que no sienten ninguna fuerza.

Habiendo establecido el vínculo entre gravedad y aceleración, Einstein estaba ahora listo para aceptar el desafío de Newton y buscar una explicación de cómo la gravedad ejerce su influencia.

Deformaciones, curvas y gravedad

Mediante la relatividad especial, Einstein demostró que cada observador corta el espaciotiempo en rebanadas paralelas que para él son el espacio entero en sucesivos instantes de tiempo, con el giro inesperado de que los observadores que se mueven uno respecto a otro a velocidad constante cortarán el espaciotiempo a ángulos diferentes. Si uno de estos observadores empezara a acelerar, usted podría conjeturar que los cambios instante-a-instante en su velocidad y/o dirección de movimiento darían como resultado cambios instante-a-instante en el ángulo y orientación de sus rebanadas. Hablando en términos generales, esto es lo que sucede. Einstein (utilizando ideas geométricas articuladas por Cari Friedrich Gauss, George

Bernhard Riemann y otros matemáticos del siglo XIX) desarrolló esta idea —a trompicones— y demostró que los cortes a ángulos diferentes de la barra espaciotemporal se funden suavemente en rebanadas que están *curvadas* pero encajan con tanta perfección como las cucharas en una cubertería de plata, como se ilustra esquemáticamente en la figura 3.8. *Un observador acelerado corta rebanadas espaciales que están deformadas*.

Con esta idea, Einstein pudo invocar el principio de equivalencia con profundas consecuencias. Puesto que gravedad y aceleración son equivalentes, Einstein comprendió que la propia gravedad no debe ser otra cosa que deformaciones y curvas en el tejido del espaciotiempo. Veíamos lo que esto significa.

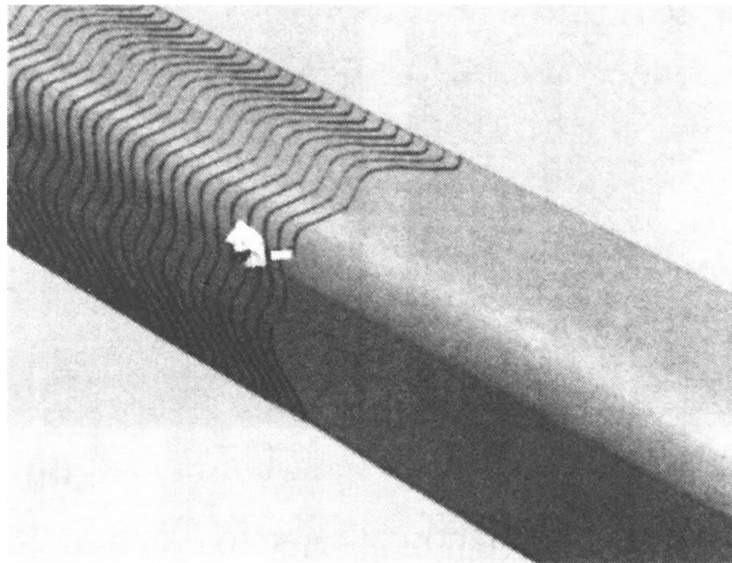


FIGURA 3.8. Según la relatividad general, no sólo la barra espaciotemporal será rebanada en el espacio en instantes de tiempo a diferentes ángulos (por observadores en movimiento relativo), sino que las propias rebanadas estarán deformadas o curvadas por la presencia de materia y energía.

Si usted hace rodar una canica a lo largo de un suelo de madera uniforme, ésta se moverá en línea recta. Pero si usted ha sufrido recientemente una terrible inundación y el suelo se ha secado dejando todo tipo de baches y deformaciones, una canica que rueda ya no se moverá a lo largo del mismo camino. En su lugar, será guiada en una u otra dirección por los baches y curvas de la superficie del suelo. Einstein aplicó esta sencilla idea al tejido del universo. Imaginó que en ausencia de materia o energía —no hay Sol, no hay Tierra, no hay estrellas— el espaciotiempo, como el suelo de madera uniforme, no tiene baches ni curvas. Es plano. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 3.9a, en la que nos centramos en una sección del espacio. Por supuesto, el espacio es realmente tridimensional, y por ello la figura 3.9b es una representación más exacta, pero los dibujos que ilustran dos dimensiones son más fáciles de entender, de modo que seguiremos utilizándolos. Einstein imaginó entonces que la presencia de materia o energía tiene un efecto sobre el espacio muy parecido al efecto que la inundación tuvo sobre el suelo. Materia y energía, como el Sol, hacen que el espacio (y el espaciotiempo[*5][3.15]) se deforme y curve como se ilustra en las figuras 3.10a y 3.10b. Y de la misma forma que una canica que rueda por el suelo deformado sigue una trayectoria curva, Einstein demostró que algo que se mueva a través del espacio deformado —como la Tierra moviéndose en la vecindad del Sol— viajará a lo largo de una trayectoria curva, como se ilustra en la figura 3.11a y la figura 3.11b.

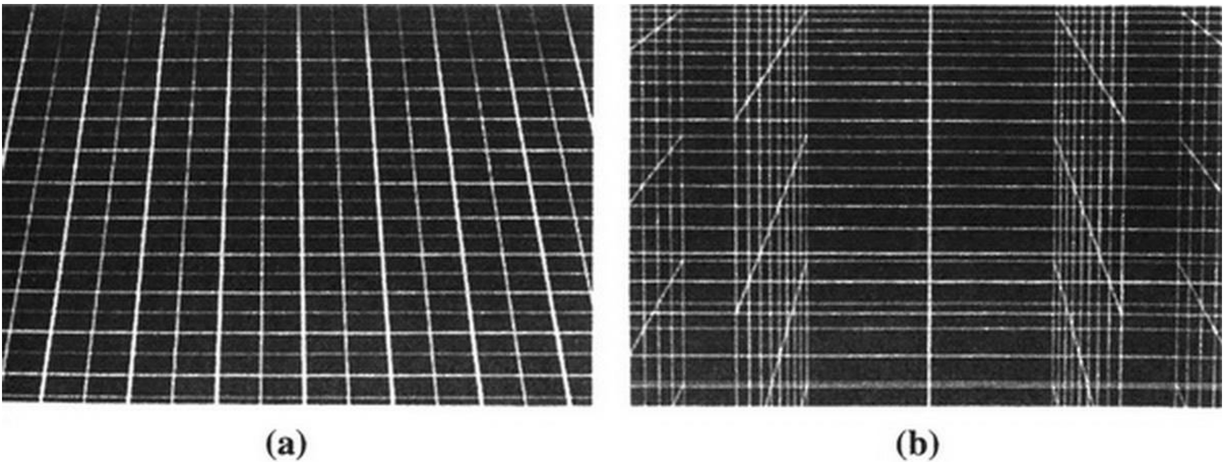


FIGURA 3.9. (**a**) Espacio plano (versión 2-d). (**b**) Espacio plano (versión 3-d).

Es como si la materia y la energía imprimieran una red de conductos y valles a lo largo de la cual los objetos son guiados por la mano invisible del tejido del espaciotiempo. Así es, según Einstein, como la gravedad ejerce su influencia. La misma idea se aplica también más cerca de casa. Precisamente ahora, a su cuerpo le gustaría deslizarse por una muesca en el tejido del espaciotiempo provocada por la presencia de la Tierra. Pero su movimiento está siendo bloqueado por la superficie sobre la que usted está sentado o de pie. El empuje hacia arriba que usted siente en casi todos los instantes de su vida —sea desde el terreno, el suelo de su casa, la silla plegable o su cama enorme— está actuando para impedirle deslizar cuesta abajo hacia un valle en el espaciotiempo. Por el contrario, si usted se arroja desde un trampolín, se abandona a la gravedad permitiendo que su cuerpo se mueva libremente a lo largo de uno de sus conductos espaciotemporales.

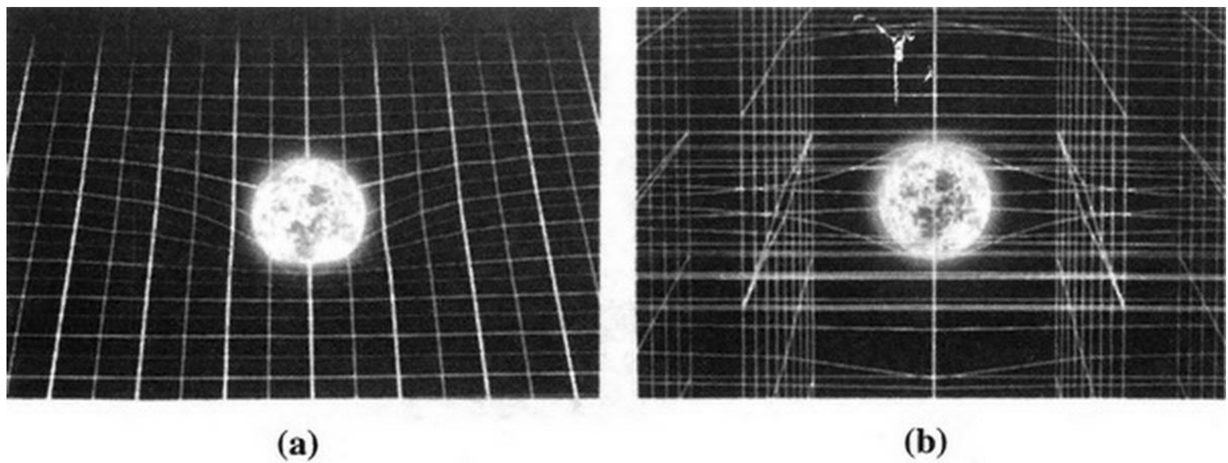


FIGURA 3.10. (**a**) El Sol deformando el espacio (versión 2-d). (**b**) El Sol deformando el espacio (versión 3-d).

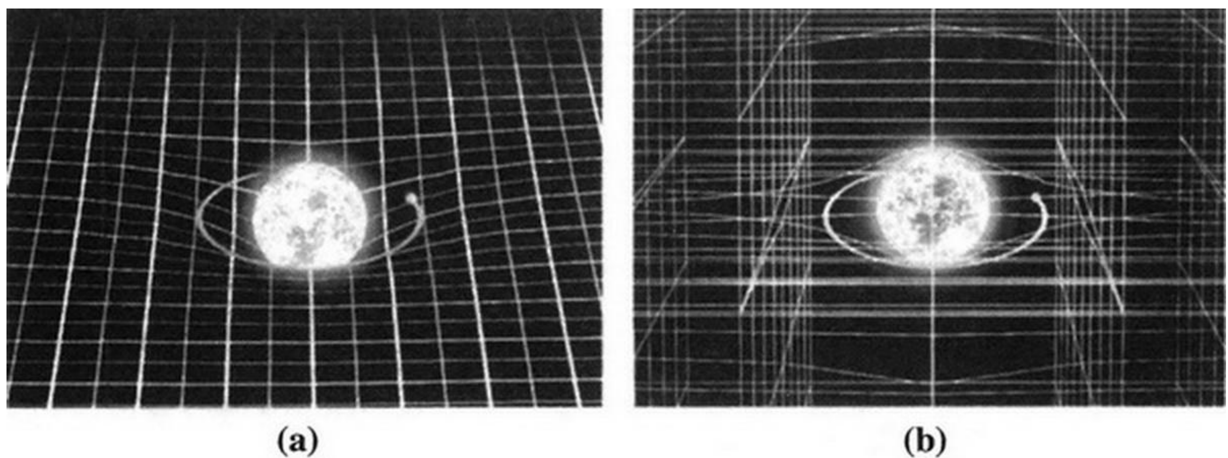


FIGURA 3.11. La Tierra permanece en órbita alrededor del Sol porque sigue curvas en el tejido del espaciotiempo causadas por la presencial del Sol. (**a**) Versión 2-d. (**b**) Versión 3-d.

Las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 ilustran esquemáticamente el triunfo de los diez años de lucha de Einstein. Gran parte de su trabajo durante estos años estaba destinado a

determinar la forma y el tamaño precisos de la deformación que provocaría una cantidad dada de materia o energía. El resultado matemático que encontró Einstein subyace a estas figuras y está encarnado en las que se denominan *ecuaciones de campo de Einstein*. Como su nombre indica, Einstein veía la deformación del espaciotiempo como manifestación —la encarnación geométrica— de un campo gravitatorio. Enmarcando geométricamente el problema, Einstein fue capaz de encontrar ecuaciones que hacen para la gravedad lo que las ecuaciones de Maxwell hacían para el electromagnetismo. [3.16] Y utilizando estas ecuaciones, Einstein y muchos otros hicieron predicciones de la trayectoria que seguiría este o aquel planeta, o incluso la luz emitida por una estrella lejana cuando atraviesa el espaciotiempo curvo. Estas predicciones no sólo han sido confirmadas con un gran nivel de exactitud sino que, puesta en competición frontal con las predicciones de la teoría de Newton, la teoría de Einstein se ajusta a la realidad con mayor fidelidad.

La misma importancia tiene el hecho de que, puesto que la relatividad general especifica el mecanismo detallado mediante el que actúa la gravedad, la teoría proporciona una herramienta matemática para determinar con qué rapidez transmite su influencia. La velocidad de transmisión se reduce a la cuestión de con qué rapidez puede cambiar en el tiempo la forma del espacio. Es decir, con qué rapidez pueden ir de un lugar a otro las deformaciones y rizos del espacio —rizos como los que causa en la superficie de un estanque una piedra que cae—. Einstein fue capaz de calcularla y la respuesta a la que llegó era enormemente satisfactoria. Encontró que deformaciones y rizos —es decir, la gravedad— no viajan instantáneamente de un lugar a otro, como lo hacen en los cálculos newtonianos de la gravedad. En su lugar, *viajan exactamente a la velocidad de*

la luz. Ni un poco más rápidos ni un poco más lentos, plenamente de acuerdo con la velocidad límite establecida por la relatividad especial. Si los alienígenas sacaran a la Luna de su órbita, las mareas retrocederían un segundo y medio después, exactamente en el mismo momento en que hubiéramos visto que la Luna había desaparecido. Donde fallaba la teoría de Newton, prevalecía la teoría de Einstein.

La relatividad general y el cubo

Además de dar al mundo una teoría elegante, conceptualmente poderosa y, por primera vez, completamente consistente de la gravedad, la teoría de la relatividad general también reconfiguró por completo nuestra visión del espacio y el tiempo. Tanto en la concepción de Newton como en la de la relatividad especial, espacio y tiempo proporcionaban un escenario invariable para los sucesos del universo. Incluso si seccionar el cosmos en rebanadas de espacio en instantes sucesivos tiene una flexibilidad en la relatividad especial impensable en la época de Newton, espacio y tiempo no responden a acontecimientos en el universo. El espaciotiempo —la barra, como lo hemos estado llamando— se toma como dado, de una vez por todas. En la relatividad general, todo esto cambia. Espacio y tiempo se hacen actores en el cosmos en evolución. Cobran vida. La materia aquí hace que el espacio se deforme allí, lo que hace que la materia de ahí se mueva, lo que hace el espacio allí se deforme aún más, y así sucesivamente. La relatividad general proporciona la coreografía para una danza cósmica del espacio, el tiempo, la materia y la energía.

Éste es un desarrollo asombroso. Pero volvamos ahora a nuestro tema central: ¿qué pasa con el cubo? ¿Proporciona

la relatividad general la base física para las ideas relacionistas de Mach, tal como esperaba Einstein?

Durante años, esta pregunta ha generado mucha controversia. Inicialmente, Einstein pensó que la relatividad general incorporaba plenamente la perspectiva de Mach, un punto de vista que consideraba tan importante que lo bautizó como *principio de Mach*. De hecho, en 1930 mientras Einstein estaba trabajando arduamente para poner en su lugar las últimas piezas de la relatividad general, escribió a Mach una carta entusiasta en la que describía cómo la relatividad general podría confirmar el análisis de Mach del experimento del cubo de Newton. [3.17] Y en 1918, cuando Einstein escribió un artículo enumerando las tres ideas esenciales tras la relatividad general, el tercer punto en su lista era el principio de Mach. Pero la relatividad general es sutil y tenía aspectos que necesitaron muchos años para que los físicos, incluyendo al propio Einstein, los apreciaran por completo. Cuando estos aspectos fueron mejor entendidos, Einstein encontró cada vez más difícil incorporar plenamente el principio de Mach en la relatividad general. Poco a poco, se desilusionó con las ideas de Mach, y en los últimos años de su vida llegó a rechazarlas. [3.18]

Con medio siglo más de investigación e intuición, podemos considerar de nuevo en qué medida la relatividad general se conforma al razonamiento de Mach. Aunque sigue habiendo alguna controversia, creo que el enunciado más preciso es que en algunos aspectos la relatividad general tiene un sabor característicamente machiano, pero no se adapta a la plena perspectiva relacionista que defendía Mach.

Esto es lo que quiero decir. Mach argumentaba[3.19] que cuando la superficie del agua en rotación se hace cóncava, o cuando usted siente que sus brazos se extienden hacia afuera, o cuando la cuerda atada a las dos piedras se pone

tensa, esto no tiene nada que ver con una hipotética —y, en su visión, completamente equivocada— noción de espacio absoluto (o espaciotiempo absoluto, en nuestro conocimiento más moderno). Más bien, él argumentó que ello es prueba de movimiento acelerado con respecto a toda la materia que hay dispersa en el cosmos. Si no hubiera materia, no habría noción de aceleración y no sucedería ninguno de los efectos físicos enumerados (agua cóncava, brazos extendidos, cuerda tensa).

¿Qué dice la relatividad general?

Según la relatividad general, las referencias para todo movimiento, y para el movimiento acelerado en particular, son los observadores en caída libre —observadores que se han abandonado completamente a la gravedad y sobre los que no actúa ninguna otra fuerza—. Ahora, un punto clave es que la fuerza gravitatoria a la que se somete un observador en caída libre surge de toda la materia (y energía) dispersa a lo largo del cosmos. La Tierra, la Luna, los planetas lejanos, estrellas, nubes de gas, cuásares y galaxias, todos contribuyen al campo gravitatorio (en lenguaje geométrico, a la curvatura del espaciotiempo) precisamente donde usted está sentado ahora. Las cosas que son más masivas y están menos lejanas ejercen una mayor influencia gravitatoria, pero el campo gravitatorio que usted siente representa la influencia combinada de toda la materia que hay ahí fuera. [3.20] El camino que usted hubiera tomado para abandonarse plenamente a la gravedad y adoptar un movimiento de caída libre —la referencia en que usted se hubiera convertido para juzgar si algún otro objeto se está acelerando— *estaría* influida por toda la materia en el cosmos, por las estrellas en el cielo y por la casa de al lado. Así pues, en relatividad general, cuando se dice que un objeto está acelerando, se quiere decir que el objeto está acelerando con respecto a una

referencia determinada por la materia dispersa por todo el universo. Ésa es una conclusión que tiene el sentido de lo que Mach defendía. Por ello, en este sentido, la relatividad general incorpora algo del pensamiento de Mach.

De todas formas, la relatividad general no confirma todo el razonamiento de Mach, como podemos ver directamente considerando, una vez más, el cubo en rotación en un universo por lo demás vacío. En un universo invariable vacío —sin estrellas, sin planetas, sin nada en absoluto— no hay gravedad. **[3.21]** Y sin gravedad, el espaciotiempo no está deformado —adopta la forma simple y no curvada mostrada en la figura 3.9b— y eso significa que estamos de nuevo en el escenario más simple de la relatividad especial. (Recordemos que Einstein ignoró la gravedad mientras desarrollaba la relatividad especial. La relatividad general corregía esta deficiencia incorporando la gravedad, pero cuando el universo es vacío e invariable no hay gravedad, y así la relatividad general se reduce a la relatividad especial.) Si ahora introducimos el cubo en este universo vacío, su masa es tan minúscula que su presencia apenas afecta a la forma del espacio y por ello la discusión que hicimos antes para el cubo en relatividad especial se aplica igualmente a la relatividad general. Contrariamente a lo que Mach hubiera predicho, la relatividad general llega a la misma respuesta que la relatividad especial, y afirma que incluso en un universo por lo demás vacío usted se *sentiría* presionado contra la pared interna del cubo en rotación; en un universo por lo demás vacío, sus brazos se *sentirían* impulsados hacia afuera si usted girara; en un universo por lo demás vacío, la cuerda entre dos piedras que giran se *pondría* tensa. La conclusión que extraemos es que, incluso en relatividad general, el espaciotiempo vacío proporciona una referencia para el movimiento acelerado.

Por ello, aunque la relatividad general incorpora algunos elementos del pensamiento de Mach, no suscribe la idea completamente relativa del movimiento que defendía Mach.[3.22] El principio de Mach es un ejemplo de una idea provocativa que inspiró un descubrimiento revolucionario, incluso si finalmente ese descubrimiento no incorporaba plenamente la idea que lo inspiró.

El espaciotiempo y el tercer milenio

El cubo giratorio ha hecho un largo viaje. Hemos pasado del espacio absoluto y el tiempo absoluto de Newton a las concepciones relaciónales de Leibniz y después de Mach; más tarde a la idea de Einstein en la relatividad especial de que el espacio y el tiempo son relativos y pese a todo en su unión llenan el espaciotiempo absoluto; y finalmente a su posterior descubrimiento en la relatividad general de que el espaciotiempo es un actor dinámico en el cosmos en desarrollo; y el cubo siempre ha estado allí. Siempre presente en la mente, ha ofrecido un test sencillo y silencioso de si el material invisible, abstracto e impalpable del espacio y, con más generalidad, el espaciotiempo es lo bastante sustancial como para proporcionar la referencia última para el movimiento. ¿El veredicto? Aunque la cuestión sigue siendo debatida, como acabamos de ver, la lectura más directa de Einstein y su relatividad general es que el espaciotiempo puede ofrecer esa referencia: *el espaciotiempo es un algo*. [3.23]

Note, sin embargo, que esta conclusión es también motivo de celebración entre los defensores de una perspectiva relacionista definida de una manera más general. En la visión de Newton, y posteriormente la de la relatividad especial, el espacio y luego el espaciotiempo se

invocaban como entidades que proporcionan la referencia para definir el movimiento acelerado, y puesto que, según estas perspectivas, el espacio y el espaciotiempo son absolutamente inmutables, esta noción de aceleración es absoluta. En la relatividad general, sin embargo, el carácter del espaciotiempo es completamente diferente. El espacio-tiempo y, en particular, la manera en que se deforma y curva, es una encarnación del campo gravitatorio. Así pues, en relatividad general la aceleración con respecto al espaciotiempo es un lejano eco de la idea absoluta invocada por teorías anteriores. En su lugar, como Einstein expuso elocuentemente pocos años antes de morir,[3.24] la aceleración con respecto al espaciotiempo de la relatividad general *es* relacional. No es una aceleración con respecto a objetos materiales como piedras o estrellas, sino que es aceleración con respecto a algo real, tangible y mutable: un campo, el campo gravitatorio. [*6]

En este sentido, el espaciotiempo —siendo la encarnación de la gravedad— es tan real en relatividad general que la referencia que ofrece es una que muchos relacionistas pueden aceptar cómodamente.

El debate sobre las cuestiones discutidas en este capítulo continuará sin duda mientras sigamos tratando de entender lo que realmente son el espacio, el tiempo y el espaciotiempo. Con el desarrollo de la mecánica cuántica, el argumento sólo se complica. Los conceptos de espacio vacío y de nada asumen un significado totalmente nuevo cuando la indeterminación cuántica entra en escena. De hecho, desde 1905, cuando Einstein prescindió del éter luminífero, la idea de que el espacio está lleno con sustancias invisibles ha hecho una firme reaparición. Como veremos en capítulos posteriores, desarrollos clave en la física moderna han restituido diversas formas de una entidad de tipo éter, ninguna de las cuales establece un patrón absoluto para el

movimiento, como hacía el éter luminífero original, pero todas ellas desafían la concepción ingenua de lo que se entiende por el hecho de que el espaciotiempo sea vacío. Además, como ahora veremos, el papel más básico que el espacio desempeña en un universo clásico —como el medio que separa un objeto de otro, como el material interpuesto que nos permite declarar decididamente que un objeto es distinto e independiente de otro— es fuertemente cuestionado por las sorprendentes conexiones cuánticas.

4

Entrelazando el espacio

¿Qué significa estar separado en un universo cuántico?

Aceptar la relatividad especial y general es abandonar el espacio absoluto y el tiempo absoluto newtonianos. Aunque no es fácil, usted puede entrenar su mente para hacerlo. Cada vez que se mueva, imagine que su ahora se está desplazando respecto a los ahora que experimentan todos los que no se mueven con usted. Cuando esté conduciendo por una autopista, imagine que su reloj marcha a un ritmo diferente de los relojes de las casas por las que está pasando. Cuando esté observando desde la cima de una montaña, imagine que, debido a la deformación del espaciotiempo, el tiempo pasa más rápidamente para usted que para los que están sometidos a una gravedad más fuerte en el terreno que hay más abajo. Yo digo «imagine» porque en circunstancias normales tales como éstas, los efectos de la relatividad son tan minúsculos que pasan completamente desapercibidos. La experiencia cotidiana no puede revelar cómo funciona realmente el universo, y por eso es por lo que cien años después de Einstein, casi nadie, ni siquiera los físicos profesionales, tiene una sensación visceral de la relatividad. Esto no es sorprendente; uno tiene dificultades para encontrar qué ventaja para la

supervivencia ofrece una sólida idea de la relatividad. Las concepciones fallidas de Newton de espacio absoluto y tiempo absoluto funcionan maravillosamente bien a las bajas velocidades y la gravedad moderada que encontramos en la vida diaria, de modo que nuestros sentidos no están bajo ninguna presión evolutiva para desarrollar la perspicacia relativista. Por consiguiente, una comprensión profunda y un verdadero conocimiento requieren que utilicemos diligentemente nuestro intelecto para llenar las lagunas que dejan nuestros sentidos.

Aunque la relatividad representó una ruptura trascendental con las ideas tradicionales sobre el universo, entre 1900 y 1930 otra revolución estaba también poniendo la física al revés. Empezó a comienzos del siglo xx con un par de artículos sobre las propiedades de la radiación, uno de Max Planck y otro de Einstein. Éstos llevaron, tras tres décadas de intensa investigación, a la formulación de la mecánica cuántica. Como sucede con la relatividad, cuyos efectos se hacen importantes en condiciones extremas de velocidad o gravedad, la nueva física de la mecánica cuántica sólo se muestra generosamente en otra situación extrema: el reino de lo extraordinariamente minúsculo. Pero hay una clara diferencia entre los cambios radicales que introducen la relatividad y la mecánica cuántica. La extrañeza de la relatividad aparece porque nuestra experiencia personal del espacio y el tiempo difiere de la experiencia de los demás. Es una extrañeza que nace de la comparación. Estamos obligados a admitir que nuestra visión de la realidad es sólo una entre muchas —infinitas, de hecho— que encajan dentro del todo sin fisuras del espaciotiempo.

La mecánica cuántica es diferente. Su extrañeza se hace evidente sin comparación. Es más difícil entrenar su mente para tener intuición mecanocuántica, porque la mecánica

cuántica hace añicos nuestra propia concepción personal e individual de la realidad.

El mundo según el cuanto

Cada época elabora sus historias o metáforas de cómo fue concebido y está estructurado el universo. Según un antiguo mito indio de la Creación, el universo fue creado cuando los dioses desmembraron al gigante primordial Purusa, cuya cabeza se convirtió en el cielo, cuyos pies se convirtieron en la Tierra y cuyo aliento se convirtió en el viento. Para Aristóteles el universo era una colección de cincuenta y cinco esferas cristalinas concéntricas; la más exterior era el cielo, que rodeaba a las de los planetas, la Tierra y sus elementos, y finalmente los siete círculos del infierno. [4.1] Con Newton y su formulación matemática determinista y precisa del movimiento, la descripción cambió de nuevo. El universo fue asemejado a un enorme y gran reloj mecánico: después de darle cuerda y ponerlo en su estado inicial, el universo mecánico sigue en marcha desde un instante al siguiente con completa regularidad y predecibilidad.

La relatividad especial y general señaló sutilezas importantes de la metáfora del reloj: no hay un único reloj universal y preferido; no hay consenso en lo que constituye un instante, lo que constituye un ahora. Incluso así, usted puede seguir contando una historia mecánica sobre el universo en evolución. El reloj es su reloj. La historia es su historia. Pero el universo se desarrolla con la misma regularidad y predecibilidad que en el marco newtoniano. Si por algún medio usted conoce el estado del universo precisamente ahora —si usted sabe dónde está cada partícula y con qué rapidez y en qué dirección se está moviendo— entonces, coinciden Newton y Einstein, usted

puede, en principio, utilizar las leyes de la física para predecir todo sobre el universo en un futuro arbitrariamente lejano o calcular cómo era en el pasado arbitrariamente lejano. [4.2]

La mecánica cuántica rompe con esta tradición. Ni siquiera podemos saber la posición exacta y la velocidad exacta de una única partícula. No podemos predecir con total certeza ni siquiera el resultado del experimento más simple, y mucho menos la evolución del cosmos entero. La mecánica cuántica muestra que lo mejor que podemos hacer es predecir la probabilidad de que un experimento salga de esta manera o de aquélla. Y puesto que la mecánica cuántica ha sido verificada a lo largo de décadas de experimentos fantásticamente precisos, el reloj cósmico newtoniano, incluso con su actualización einsteiniana, es una metáfora insostenible; decididamente no es cómo funciona el mundo.

Pero la ruptura con el pasado es aún más completa. Incluso si las teorías de Newton y Einstein difieren claramente en lo que respecta a la naturaleza del espacio y el tiempo, coinciden en ciertos hechos básicos, ciertas verdades que parecen ser evidentes. Si hay espacio entre dos objetos —si hay dos pájaros en el cielo y uno sale volando hacia la derecha y el otro sale volando hacia la izquierda— podemos considerar, y lo hacemos, que los objetos son independientes. Los consideramos como entidades separadas y distintas. El espacio, cualquier cosa que sea fundamentalmente, proporciona el medio que separa y distingue un objeto de otro. Eso es lo que hace el espacio. Cosas que ocupan lugares diferentes en el espacio son cosas diferentes. Además, para que un objeto influya en otro, debe franquear de alguna manera el espacio que los separa. Un pájaro puede volar hacia el otro, atravesando el espacio entre ambos, y entonces picotear o empujar a su

compañero. Una persona puede influir en otra disparando un tirachinas, haciendo que una piedra atraviese el espacio entre ellas; o puede influir gritando, causando un efecto dominó de moléculas de aire que chocan unas con otras, poniendo en movimiento a las vecinas hasta producir un bang en el tímpano del receptor. Siendo aún más sofisticados, uno puede ejercer influencia sobre otro encendiendo un láser, que genera una onda electromagnética —un rayo de luz— que atraviesa el espacio interpuesto; o, siendo más ambicioso (como los extraterrestres del último capítulo) uno puede agitar o desplazar un cuerpo masivo (como la Luna) enviando una perturbación gravitatoria desde un lugar a otro. Por supuesto, si estamos aquí podemos influir en alguien allí, pero, no importa cómo lo hagamos, el procedimiento siempre implica a alguien o algo que viaja de aquí a allí, y sólo cuando alguien o algo llega allí puede ejercerse la influencia.

Los físicos llaman a esta característica del universo localidad, lo que resalta el hecho de que usted puede influir directamente sólo en las cosas que están próximas, que son locales. El vudú contraviene la localidad, puesto que implica hacer algo aquí e influir en algo allí sin necesidad de que nada viaje de aquí a allí, pero la experiencia común nos lleva a pensar que experimentos repetibles y verifícales confirmarían la localidad. [4.3] Y la mayoría lo hacen.

Pero una clase de experimentos realizados durante las dos últimas décadas han mostrado que algo que hacemos aquí (tal como medir ciertas propiedades de una partícula) puede estar sutilmente entretejido con algo que sucede allí (tal como el resultado de medir ciertas propiedades de otra partícula distante) sin que se envíe nada de aquí a allí. Aunque intuitivamente desconcertante, este fenómeno se ajusta por completo a las leyes de la mecánica cuántica, y

fue predicho utilizando la mecánica cuántica mucho antes de que existiera la tecnología para hacer el experimento y observar, lo que resulta extraordinario, que la predicción es correcta. Esto suena como el vudú; Einstein, que estaba entre los primeros físicos en reconocer —y criticar seriamente— esta posible característica de la mecánica cuántica, la llamó «fantasmal». Pero como veremos, los vínculos a larga distancia que estos experimentos confirman son extraordinariamente delicados y, en un sentido preciso, están fundamentalmente más allá de nuestra capacidad de control

De todas formas, estos resultados, que proceden de consideraciones tanto teóricas como experimentales, apoyan con fuerza la conclusión de que el universo admite interconexiones que son no locales. [4.4] Algo que sucede aquí puede estar entrelazado con algo que sucede allí incluso si nada viaja de aquí a allí —e incluso si no hay tiempo suficiente para que algo, ni siquiera la luz, viaje entre los sucesos—. Esto significa que el espacio no puede considerarse como lo fue una vez: el espacio interpuesto, por mucho que haya, no asegura que dos objetos estén separados, puesto que la mecánica cuántica permite un entrelazamiento, un tipo de conexión, que existe entre ellos. Una partícula, como una de las innumerables partículas que le constituyen a usted o a mí, puede pasar pero no puede ocultarse. Según la teoría cuántica y los muchos experimentos que apoyan sus predicciones, la conexión cuántica entre dos partículas puede persistir incluso si están en lados opuestos del universo. Desde el punto de vista de su entrelazamiento, independientemente de los muchos billones de kilómetros de espacio entre ellas, es como si estuviesen una encima de otra.

Numerosos asaltos a nuestra idea de la realidad están emergiendo de la física moderna; encontraremos muchos en

los capítulos siguientes. Pero de entre los que han sido verificados experimentalmente, no encuentro ninguno más extraordinario que la reciente comprensión de que nuestro universo es no local.

El rojo y el azul

Para hacemos una idea del tipo de no localidad que emerge de la mecánica cuántica imaginemos que la agente Scully, que hacía tiempo que se merecía unas vacaciones, se ha retirado a la hacienda de su familia en Provence. Antes de que tenga tiempo de deshacer sus maletas suena el teléfono. Es el agente Mulder que llama desde América.

«¿Recibiste la caja, la envuelta en papel rojo y azul?»

Scully, que al entrar ha puesto todo su correo en un montón, mira y ve el paquete. «Mulder, por favor, no hice todo el camino hasta Aix-en-Provence para trabajar con otro montón de ficheros.»

«No, no, el paquete no es mío. Yo también recibí uno, y dentro hay esas pequeñas cajas herméticas de titanio, numeradas de 1 a 1.000, y una carta que dice que tú también recibirías un paquete idéntico.»

«Sí, ¿y qué?», responde Scully lentamente, empezando a temer que las cajas de titanio puedan poner fin a sus vacaciones.

«Bien», continúa Mulder, «la carta dice que cada caja de titanio contiene una esfera alienígena que emitirá un destello rojo o azul en el momento en que se abra la pequeña puerta lateral que tiene.»

«Mulder, ¿se supone que tengo que estar impresionada?»

«Todavía no, pero escucha. La carta dice que antes de que se abra cualquier caja dada, la esfera tiene la

capacidad de emitir un destello o rojo o azul, y decide aleatoriamente entre un color u otro en el momento en que se abre la puerta. Pero aquí viene la parte extraña. La carta dice que aunque tus cajas funcionan exactamente igual que las mías —incluso si las esferas dentro de cada una de nuestras cajas eligen aleatoriamente entre emitir un destello rojo o uno azul— nuestras cajas de algún modo funcionan conjuntamente. La carta afirma que existe una conexión misteriosa, de modo que si yo veo un destello azul cuando abra mi caja 1, tú también verás un destello azul cuando abras tu caja 1; si yo veo un destello rojo cuando abra mi caja 2, tú también verás un destello rojo al abrir tu caja 2, y así sucesivamente.»

«Mulder, estoy realmente agotada. Deja estar los trucos de salón y espera hasta que esté de vuelta.»

«Por favor, Scully. Ya sé que estás de vacaciones, pero no podemos dejarlo. Sólo necesitamos unos minutos para ver si es cierto.»

A regañadientes, Scully se da cuenta de que es inútil resistirse, de modo que va y abre sus pequeñas cajas. Y al comparar los colores de los destellos de cada caja, Scully y Mulder encuentran realmente el acuerdo que predecía la carta. A veces la esfera de una caja emite un destello rojo, y a veces azul, pero al abrir cajas con el mismo número, Scully y Mulder ven siempre un destello del mismo color. Él está cada vez más excitado y agitado por las esferas alienígenas pero ella sigue totalmente impertérrita.

«Mulder», dice seriamente Scully por el teléfono, «realmente necesitas unas vacaciones. Esto es una tontería. Obviamente, la esfera que hay dentro de cada una de nuestras cajas ha sido programada para emitir un destello rojo o ha sido programada para emitir un destello azul cuando se abre la puerta de su caja. Y quienquiera que nos envió esta cosa absurda programó nuestras cajas de forma

idéntica de modo que tú y yo vemos un destello del mismo color en cajas con el mismo número.»

«Pero, Scully, la carta dice que cada esfera alienígena escoge aleatoriamente entre emitir un destello azul y un destello rojo cuando se abre la puerta, no que la esfera haya sido preprogramada para escoger un color o el otro.»

«¡Mulder!», grita Scully. «Mi explicación tiene perfecto sentido y encaja todos los datos. ¿Qué más quieres? Y mira aquí, al final de la carta. Aquí está lo más gracioso de todo. La pequeña imprenta “alienígena” nos informa de que no sólo la apertura de la puerta de una caja hará que la esfera en su interior emita un destello, sino que cualquier otra manipulación con la caja para descubrir cómo funciona — por ejemplo, si tratamos de examinar la composición química o el color de la esfera antes de que la caja se abra — también hará que emita un destello. En otras palabras, no podemos analizar la supuesta selección aleatoria de rojo o azul porque cualquier intento contaminará el propio experimento que estamos tratando de realizar. Es como si yo te dijera que realmente soy rubia, pero me convierto en pelirroja cuando tú o cualquier otro mira mi pelo o lo analiza de cualquier manera. ¿Cómo podrías demostrar alguna vez que estoy equivocada? Tus hombrecillos verdes son muy astutos —ellos han hecho las cosas de modo que no puedan ser desenmascarados—. Ahora, ve y juega con tus pequeñas cajas mientras yo disfruto de un poco de paz y tranquilidad.»

Parecería que Scully se ha puesto del lado de la ciencia. Pese a todo, aquí está el problema. Los mecánicos cuánticos —los científicos, no los alienígenas— han estado haciendo durante casi ochenta años afirmaciones sobre el funcionamiento del universo que se parecen mucho a las descritas en la carta. Y el caso es que ahora hay fuerte evidencia científica en apoyo de un punto de vista parecido

al de Mulder y al de Scully. Por ejemplo, según la mecánica cuántica una partícula puede estar en una especie de limbo a medias entre tener una u otra propiedad particular —como una esfera «alienígena» indecisa entre emitir destellos rojos y emitir destellos azules antes de que se abra la puerta de su caja— y sólo cuando la partícula es examinada (medida) se compromete aleatoriamente con una propiedad definida u otra. Por si esto no fuera suficientemente extraño, la mecánica cuántica predice también que puede haber conexiones entre partículas, similares a las que se dice que existen entre las esferas alienígenas. Dos partículas pueden estar tan entrelazadas por los efectos cuánticos que su selección aleatoria de una propiedad u otra está correlacionada: de la misma forma que cada una de las esferas alienígenas escoge aleatoriamente entre rojo y azul y, pese a todo, los colores escogidos por las esferas en las cajas con el mismo número están correlacionados (ambas emiten destellos rojos o ambas emiten destellos azules), también las propiedades escogidas aleatoriamente por las dos partículas, incluso si están muy separadas en el espacio, pueden estar en perfecta correspondencia. Hablando en términos generales, incluso si las dos partículas están ampliamente separadas la mecánica cuántica muestra que haga lo que haga una partícula, también la hará la otra.

Como un ejemplo concreto, si usted lleva un par de gafas de sol, la mecánica cuántica muestra que existe una probabilidad 50-50 de que un fotón particular —como uno que es reflejado hacia usted desde la superficie de un lago o desde una carretera asfaltada— atravesará sus lentes polarizadas para reducir el brillo: cuando el fotón incide en las gafas, «escoge» aleatoriamente entre reflejarse y atravesarlas. Lo sorprendente es que dicho fotón puede tener un fotón compañero que ha ido a kilómetros de

distancia en dirección opuesta y, pese a todo, cuando se enfrenta a la misma probabilidad 50-50 de atravesar otra lente de gafas polarizada hará lo que hace el fotón inicial. Incluso si cada resultado se decide aleatoriamente e incluso si los fotones están muy separados en el espacio, si un fotón pasa, también lo hará el otro. Éste es el tipo de no localidad predicha por la mecánica cuántica.

Einstein, que nunca fue un gran fan de la mecánica cuántica, era reacio a aceptar que el universo actuara según reglas tan extrañas. Defendió explicaciones más convencionales que prescindían de la idea de que las partículas seleccionan aleatoriamente atributos y resultados cuando son medidas. En su lugar, Einstein argumentó que si se observa que dos partículas ampliamente separadas comparten ciertos atributos, esto no es evidencia de ninguna misteriosa conexión cuántica que correlaciona instantáneamente sus propiedades. De la misma forma que Scully argumentaba que las esferas no escogen aleatoriamente entre rojo y azul, sino que están programadas para emitir destellos de un color concreto cuando son observadas, Einstein afirmaba que las partículas no escogen aleatoriamente entre tener una propiedad u otra, sino que están similarmente «programadas» para tener una propiedad definida y particular cuando son medidas adecuadamente. La correlación entre el comportamiento de fotones ampliamente separados es una prueba, afirmaba Einstein, de que los fotones estaban dotados de propiedades idénticas cuando fueron emitidos, y no de que estén sometidos a algún extraño entrelazamiento cuántico a larga distancia.

Durante cerca de cinco décadas, la cuestión de quién tenía razón —Einstein o los defensores de la mecánica cuántica— quedó sin respuesta porque, como veremos, el debate se hizo muy parecido al que mantenían Scully y

Mulder: cualquier intento de refutar las extrañas conexiones mecanocuánticas propuestas y dejar intacta la idea más convencional de Einstein tropezaba con la afirmación de que los propios experimentos contaminarían necesariamente las propiedades mismas que trataban de estudiar. Todo esto cambió en la década de 1960. Con una intuición sorprendente, el físico irlandés John Bell demostró que la cuestión podía dirimirse experimentalmente, y en la década de 1980 lo fue. La lectura más directa de los datos es que Einstein estaba equivocado y existen conexiones extrañas y «fantasmales» entre cosas aquí y cosas allí. [4.5]

El razonamiento que hay tras esta conclusión es tan sutil que los físicos necesitaron más de tres décadas para apreciarlo plenamente. Pero después de cubrir los aspectos esenciales de la mecánica cuántica veremos que el núcleo del argumento se reduce a algo que no es más complicado que un rompecabezas Click y Clack.

Lanzando una onda

Tome un trozo de película fotográfica de 35 milímetros, sobreexpóngala hasta que quede negra y raspe la emulsión en dos líneas muy estrechas y próximas. Si ahora dirige un puntero láser hacia este trozo de película, usted verá la prueba directa de que la luz es una onda. Si nunca hizo esto, vale la pena intentarlo (puede utilizar muchas cosas en lugar de la película, la malla metálica de un filtro de cafetera, por ejemplo). La imagen que verá cuando la luz láser atraviese las rendijas de la película e incida en una pantalla consiste en bandas brillantes y oscuras, como en la figura 4.1, y la explicación para esta figura se basa en una característica básica de las ondas. Las ondas de agua son las más fáciles de visualizar, de modo que expliquemos

primero el punto esencial con ondas en un lago grande y tranquilo, y luego las aplicaremos a nuestra comprensión de la luz.

Una onda de agua perturba la superficie plana de un lago creando regiones donde el nivel del agua es mayor que lo habitual y regiones donde es menor que lo habitual. La parte más alta de una onda se denomina su cresta y la parte más baja se denomina su vientre. Una onda típica implica una sucesión periódica: crestas seguidas de vientres seguidos de crestas, y así sucesivamente. Si dos ondas se dirigen una hacia otra —si, por ejemplo, usted y yo dejamos caer una piedra en el lago en posiciones vecinas, produciendo ondas circulares que parten de los puntos de caída y se acercan una a otra— cuando se crucen darán

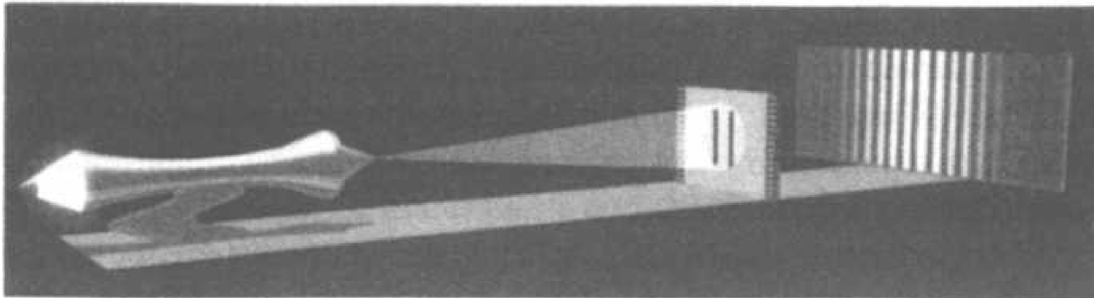


FIGURA 4.1. Un haz láser que atraviesa dos rendijas grabadas en un trozo de película negra da una figura de interferencia en una pantalla detectora, lo que demuestra que la luz es una onda.

como resultado un efecto importante conocido como interferencia, ilustrado en la figura 4.2a. Cuando se cruzan una cresta de una onda y una cresta de la otra, la altura del agua es aún mayor, al ser la suma de las alturas de las dos crestas. Análogamente, cuando se cruzan un vientre de una onda y un vientre de la otra, la depresión en el agua es aún más profunda, al ser la suma de dos depresiones. Y ahora

viene la combinación más importante: cuando una cresta de una onda se cruza con un vientre de la otra, se cancelan mutuamente, pues la cresta trata de hacer que el agua suba mientras que el vientre trata de arrastrarla hacia abajo. Si la altura de la cresta de una onda iguala a la profundidad del vientre de la otra, habrá cancelación perfecta cuando se crucen, de modo que el agua en esa posición no se moverá en absoluto.

El mismo principio explica la figura que forma la luz cuando atraviesa las dos rendijas en la figura 4.1. La luz es una onda electromagnética; cuando atraviesa las dos rendijas, se divide en dos ondas que se dirigen hacia la pantalla. Como las dos ondas de agua que acabamos de comentar, las dos ondas de luz interfieren mutuamente. Cuando inciden en diferentes puntos de la pantalla, hay veces en que ambas ondas están en su cresta, haciendo que la pantalla brille; otras veces ambas ondas están en sus vientres, haciéndola brillar también; pero a veces una onda está en su cresta y la otra está en su vientre y se cancelan, haciendo que quede oscuro el punto de la pantalla. Ilustramos esto en la figura 4.2b.

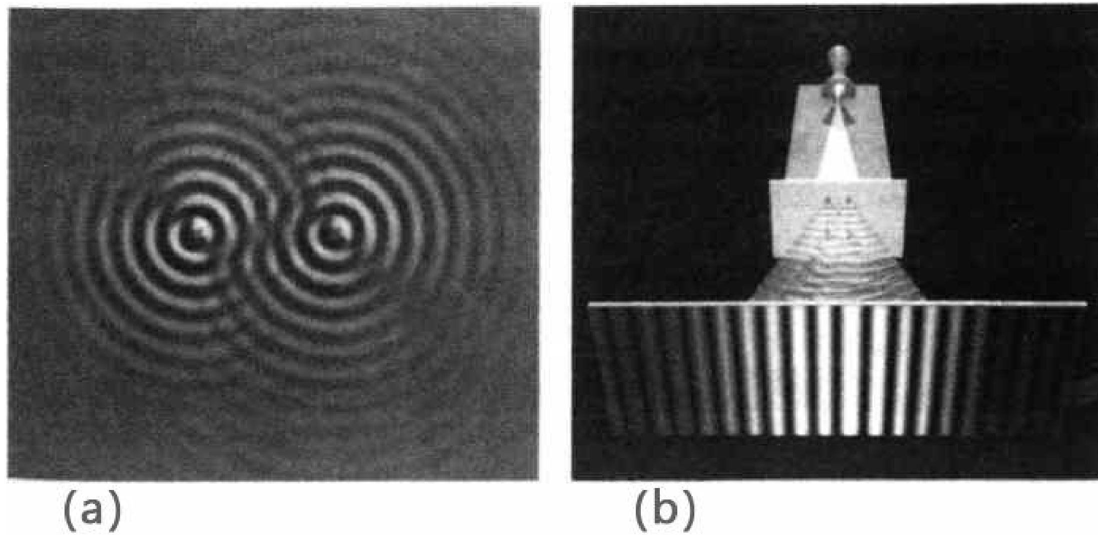


FIGURA 4.2. (a) El solapamiento de ondas de agua produce una figura de interferencia. (b) El solapamiento de ondas luminosas produce una figura de interferencia.

Cuando se analiza con detalle el movimiento de la onda, incluyendo los casos de cancelación parcial entre ondas en diversas fases entre crestas y vientres, se puede demostrar que los puntos brillantes y oscuros llenan las bandas vistas en la figura 4.1. Las bandas brillantes y oscuras son por lo tanto una señal reveladora de que la luz es una onda, una cuestión que había sido ardientemente debatida desde que Newton afirmó que la luz no es una onda, sino que está constituida de un chorro de partículas (más sobre esto dentro de un momento). Además, este análisis se aplica igualmente a cualquier tipo de onda (onda luminosa, onda de agua, onda sonora, ponga usted las que quiera) y así, las figuras de interferencia proporcionan la señal de humo metafísica: usted sabe que está tratando con una onda si, cuando se le obliga a atravesar dos rendijas del tamaño correcto (determinado por la distancia entre las crestas y los vientres de la onda) la figura de intensidad resultante se

parece a la de la figura 4.1 (con regiones brillantes que representan intensidad alta y regiones oscuras que son de baja intensidad).

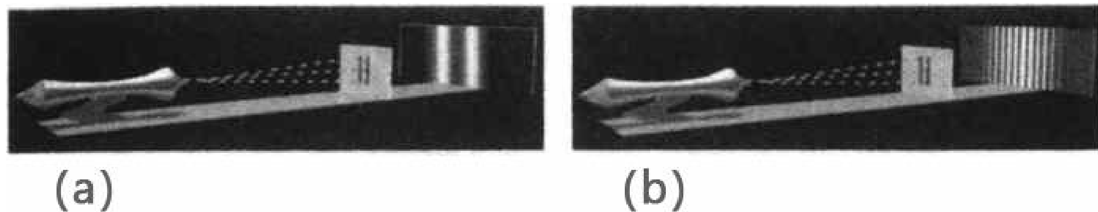


FIGURA 4.3. (a) La física clásica predice que los electrones lanzados contra una barrera con dos rendijas producirán dos franjas brillantes en un detector, (b) La física cuántica predice, y los experimentos confirman, que los electrones lanzados contra una barrera con dos rendijas producirán una figura de interferencia, lo que muestra que incorporan características tipo onda.

En 1927, Clinton Davisson y Lester Germer lanzaron un haz de electrones —entidades de tipo partícula sin ninguna conexión aparente con las ondas— contra un trozo de cristal de níquel; los detalles no nos interesan, pero lo que importa es que este experimento es equivalente a disparar un haz de electrones contra una barrera con dos rendijas. Cuando los experimentadores permitieron que los electrones que atravesaban las rendijas continuaran su viaje hasta una pantalla de fósforo donde la posición de su impacto era registrada por un destello minúsculo (el mismo tipo de destellos responsables de la imagen en la pantalla de su televisor), los resultados fueron asombrosos. Considerando los electrones como pequeñas píldoras o balas, usted esperaría naturalmente que las posiciones de sus impactos estuvieran alineadas con las dos rendijas, como en la figura 4.3a. Pero no es eso lo que encontraron Davisson y Germer. Su experimento produjo los datos ilustrados esquemáticamente en la figura 4.3b: las posiciones de los

impactos electrónicos formaban una figura de interferencia característica de las ondas. Davisson y Germer habían encontrado la señal. Habían demostrado que el haz de electrones debe ser, inesperadamente, un cierto tipo de onda.

Quizá usted no considere esto particularmente sorprendente. El agua está hecha de moléculas de H_2O, y una onda de agua aparece cuando muchas moléculas se mueven en una pauta coordinada. Un grupo de moléculas de H_2O sube en un lugar, mientras que otro desciende en un lugar vecino. Quizá los datos ilustrados en la figura 4.3 muestran que los electrones, como las moléculas de H_2O, se mueven a veces al unísono, creando una pauta ondulatoria en su movimiento macroscópico y global. Aunque a primera vista esto podría parecer una sugerencia razonable, la historia real es mucho más inesperada.

Inicialmente imaginábamos que un diluvio de electrones era disparado continuamente desde el cañón de electrones en la figura 4.3. Pero podemos ajustar el cañón de modo que dispare cada vez menos electrones por segundo. De hecho, podemos ajustarlo hasta que dispare, digamos, sólo un electrón cada diez segundos. Con suficiente paciencia podemos realizar este experimento durante un largo período de tiempo y registrar la posición de los impactos de cada electrón individual que atraviesa las rendijas. Las figuras 4.4a-4.4c muestran los datos acumulados al cabo de una hora, de medio día y de un día entero. En la década de 1920, imágenes como ésta sacudieron los fundamentos de la física. Vemos que incluso electrones individuales, que se mueven hacia la pantalla de uno en uno, individualmente, forman la figura de interferencia característica de las ondas.

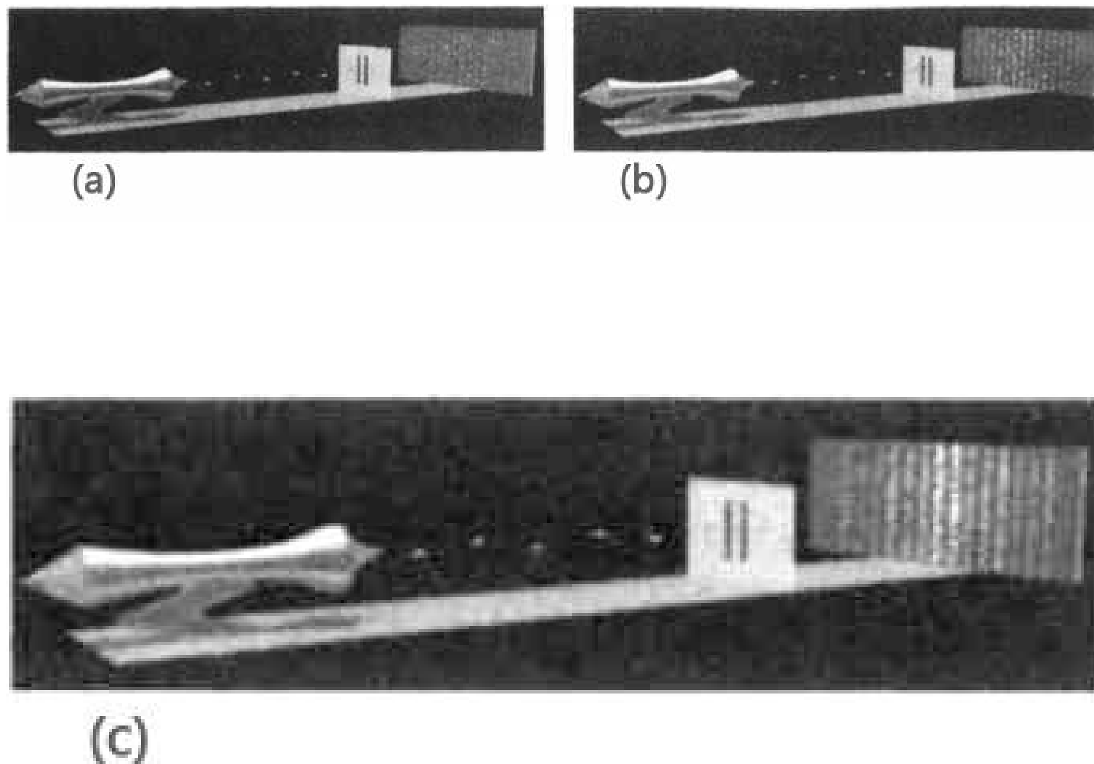


FIGURA 4.4. Electrones lanzados uno a uno hacia las rendijas forman una figura de interferencia punto a punto. En (a)-(c) ilustramos la figura a medida que se va formando a lo largo del tiempo.

Esto es como si una molécula individual de H_2O pudiera encarnar todavía algo afín a una onda de agua. Pero ¿cómo diantres podría ser así? El movimiento ondulatorio parece ser una propiedad colectiva que no tiene significado cuando se aplica a ingredientes independientes. Si los espectadores que están en las gradas se ponen de pie y se sientan cada pocos minutos, independientemente unos de otros, ellos no están haciendo la ola. Más que eso, la interferencia de ondas parece exigir que una onda procedente de aquí se cruce con una onda procedente de allí. Así que ¿cómo puede darse interferencia con ingredientes simples e

individuales? Pero el caso es que de algún modo, como atestiguan los datos de interferencia en la figura 4.4, incluso si los electrones individuales son partículas minúsculas de materia, todos y cada uno de ellos encaman también una naturaleza de tipo onda.

La probabilidad y las leyes de la física

Si un electrón individual es también una onda, ¿qué es lo que está ondulando? Erwin Schródinger hizo la primera conjetura: quizá el material del que están hechos los electrones puede estar extendido por el espacio y es esta esencia electrónica extendida la que ondula. Desde este punto de vista, un electrón sería un pico estrecho en una niebla electrónica. Sin embargo, rápidamente se vio que esta sugerencia no podía ser correcta, porque incluso una forma de onda con un pico abrupto —tal como una ola de marea gigante— acaba dispersándose. Y si la onda electrónica puntiaguda se dispersara esperaríamos encontrar parte de la carga electrónica de un único electrón aquí o parte de su masa allí. Pero nunca lo hacemos. Cuando localizamos un electrón, siempre encontramos toda su masa y toda su carga concentrada en una región minúscula puntual. En 1927, Max Bom propuso una sugerencia diferente, que resultó ser el paso decisivo que obligó a los físicos a entrar en un reino radicalmente nuevo. La onda, afirmaba, no es un electrón disperso, ni es nada encontrado antes en la ciencia. La onda, proponía Bom, es una onda de probabilidad.

Para entender lo que esto significa, imagine una fotografía de una onda de agua que muestra regiones de alta intensidad (cerca de las crestas y los vientres) y regiones de baja intensidad (cerca de las regiones más

planas de transición entre crestas y vientres). Cuanto mayor es la intensidad, mayor es la capacidad que tiene la onda de agua para ejercer fuerza sobre barcos próximos o sobre estructuras costeras. Las ondas de probabilidad imaginadas por Bom también tienen regiones de alta y baja intensidad, pero el significado que él atribuía a estas formas de onda era inesperado: el tamaño de una onda en un punto dado en el espacio es proporcional a la probabilidad de que el electrón esté localizado en dicho punto en el espacio. Lugares donde la onda de probabilidad es grande son lugares donde es más probable encontrar al electrón. Lugares donde la onda de probabilidad es pequeña son lugares donde es poco probable encontrar al electrón. Y lugares donde la onda de probabilidad es cero son lugares donde no se encontrará al electrón.

La figura 4.5 da una «instantánea» de una onda de probabilidad con las etiquetas que resaltan la interpretación probabilista de Bom. No obstante, a diferencia de una fotografía de ondas de agua, esta imagen no podría haberse tomado con una cámara. Nadie ha visto nunca directamente una onda de probabilidad, y el razonamiento mecano-cuántico convencional dice que nadie la verá. En su lugar, utilizamos ecuaciones matemáticas (desarrolladas por Schródinger, Niels Bohr, Wemer Heisenberg, Paul Dirac y otros) para calcular cómo debería ser la onda de probabilidad en una situación dada.

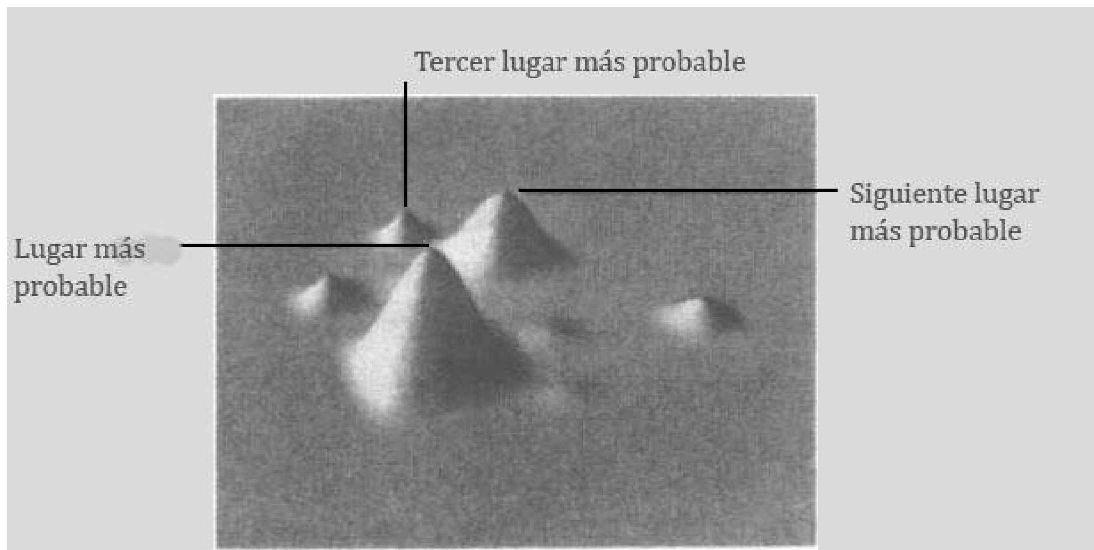


FIGURA 4.5. La onda de probabilidad de una partícula, tal como un electrón, nos dice la probabilidad de encontrar la partícula en un lugar u otro.

Entonces ponemos a prueba dichos cálculos teóricos comparándolos con resultados experimentales de la siguiente manera. Después de calcular la supuesta onda de probabilidad del electrón en un montaje experimental dado, realizamos versiones idénticas del experimento una y otra vez partiendo de cero, registrando cada vez la posición medida del electrón. Contrariamente a lo que Newton habría esperado, experimentos idénticos y condiciones de partida idénticas no conducen necesariamente a medidas idénticas. En su lugar, nuestras medidas dan una variedad de localizaciones medidas. A veces encontramos al electrón aquí, a veces allí, y de cuando en cuando lo encontramos mucho más allá. Si la mecánica cuántica es correcta, el número de veces que encontramos al electrón en un punto dado debería ser proporcional al tamaño (en realidad, al cuadrado del tamaño) que tiene en ese punto la onda de probabilidad que hemos calculado. Ocho décadas de

experimentos han mostrado que las predicciones de la mecánica cuántica son confirmadas con una precisión espectacular.

Sólo una porción de la onda de probabilidad de un electrón se muestra en la figura 4.5: según la mecánica cuántica, cada onda de probabilidad se extiende por todo el espacio, por el universo entero. [4.6] Sin embargo, en muchas circunstancias la onda de probabilidad de una partícula cae rápidamente hasta un valor muy próximo a cero fuera de una región pequeña, lo que indica que hay una probabilidad aplastante de que la partícula esté en dicha región. En tales casos, la parte de la onda de probabilidad que queda fuera de la figura 4.5 (la parte que se extiende por el resto del universo) se parece mucho a la parte próxima a los límites de la figura: completamente plana y cerca de un valor cero. De todas formas, puesto que la onda de probabilidad en algún lugar de la galaxia Andrómeda tiene un valor no nulo, por pequeño que sea, hay una probabilidad minúscula pero genuina —no nula— de que el electrón pudiera ser encontrado allí.

Así pues, el éxito de la mecánica cuántica nos obliga a aceptar que el electrón, un constituyente de la materia que normalmente imaginamos que ocupa una minúscula región puntual del espacio, también tiene una descripción que incluye una onda que, por el contrario, está extendida por todo el universo. Además, según la mecánica cuántica esta fusión partícula-onda vale para todos los constituyentes de la Naturaleza, no sólo para los electrones: los protones son a la vez de tipo partícula y tipo onda, los neutrones son a la vez de tipo partícula y tipo onda. Y experimentos a principios del siglo xx establecieron que la luz —que demostrablemente se comporta como una onda, como se ve en la figura 4.1— puede describirse también en términos de ingredientes de tipo partícula, los pequeños «paquetes

de luz» llamados fotones que se han mencionado antes. [4.7] Por ejemplo, las familiares ondas electromagnéticas emitidas por una bombilla de 100 vatios pueden describirse igualmente bien en términos de la emisión por la bombilla de aproximadamente un centenar de trillones de fotones cada segundo. En el mundo cuántico hemos aprendido que todo tiene a la vez atributos tipo partícula y tipo onda.

Durante las últimas ocho décadas, la ubicuidad y utilidad de las ondas de probabilidad mecanocuánticas para predecir y explicar resultados experimentales han quedado establecidas más allá de cualquier duda. Pese a todo, todavía no hay un consenso universal sobre la forma de concebir qué son realmente las ondas de probabilidad mecanocuánticas. Aún se debate si deberíamos decir que la onda de probabilidad de un electrón es el electrón, o que está asociada con el electrón, o que es un artificio matemático para describir el movimiento del electrón, o que es la encarnación de lo que podemos saber sobre el electrón. Lo que es evidente, no obstante, es que a través de dichas ondas la mecánica cuántica inyecta probabilidad en las leyes de la física de una manera que nadie había previsto. Los meteorólogos utilizan la probabilidad para predecir la posibilidad de lluvia. Los casinos utilizan la probabilidad para predecir la posibilidad de que usted saque dos ases. Pero la probabilidad desempeña un papel en estos ejemplos porque no tenemos toda la información necesaria para hacer predicciones definitivas. Según Newton, si conociéramos con todo detalle el estado del entorno (las posiciones y velocidades de cada uno de sus ingredientes), podríamos predecir (dada la suficiente destreza de cálculo) con certeza si lloverá mañana a las 16.07; si conociéramos todos los detalles físicos de relevancia en un juego de dados (la forma y composición precisas de los dados, su velocidad y orientación cuando salen de la mano, la composición de la

mesa y su superficie, y todo lo demás) podríamos predecir con certeza cómo acabaría el dado. Puesto que, en la práctica, no podemos reunir toda esta información (e, incluso si pudiéramos, aún no disponemos de ordenadores suficientemente potentes para realizar los cálculos necesarios para hacer tales predicciones), nos fijamos una meta más modesta y predecimos sólo la probabilidad de un resultado dado para el tiempo atmosférico o en el casino, haciendo conjeturas razonables sobre los datos que no tenemos.

La probabilidad introducida por la mecánica cuántica es de un carácter diferente y más fundamental. Independientemente de mejoras en la recolección de datos o en la potencia de los ordenadores, lo más que podemos hacer, según la mecánica cuántica, es predecir la probabilidad de que un electrón, o un protón, o un neutrón, o cualquier otro de los constituyentes de la Naturaleza sea encontrado aquí o allí. La probabilidad reina suprema en el microcosmos.

Como ejemplo, la explicación que da la mecánica cuántica en el caso de los electrones que, individualmente, de uno en uno, forman con el tiempo la figura de bandas brillantes y oscuras en la figura 4.4, es ahora clara. Cada electrón individual está descrito por su onda de probabilidad. Cuando se dispara un electrón, su onda de probabilidad fluye a través de ambas rendijas. E igual que las ondas de luz y las ondas de agua, las ondas de probabilidad que emanan de las dos rendijas interfieren mutuamente. En algunos puntos de la pantalla detectora las dos ondas de probabilidad se refuerzan y la intensidad resultante es grande. En otros puntos las ondas se cancelan parcialmente y la intensidad es pequeña. Y en otros puntos, las crestas y vientres de las ondas de probabilidad se cancelan por completo y la intensidad de la onda resultante

es exactamente cero. Es decir, hay puntos en la pantalla donde es muy probable que llegue un electrón, puntos donde es mucho menos probable que llegue y lugares donde no hay ninguna posibilidad de que llegue un electrón. Con el tiempo, las posiciones de llegada de los electrones se distribuyen según este perfil de probabilidad, y con ello obtenemos algunas regiones brillantes, algunas más oscuras y algunas regiones completamente negras en la pantalla. El análisis detallado muestra que estas regiones brillantes y oscuras se verán exactamente como en la figura 4.4.

Einstein y la mecánica cuántica

Debido a su naturaleza intrínsecamente probabilista, la mecánica cuántica difiere radicalmente de cualquier descripción fundamental previa del universo, cualitativa o cuantitativa. Desde su nacimiento en el siglo pasado, los físicos se han esforzado en hacer compatible este marco extraño e inesperado con la visión del mundo común; este esfuerzo aún está en marcha. El problema está en reconciliar la experiencia macroscópica de la vida cotidiana con la realidad microscópica revelada por la mecánica cuántica. Estamos acostumbrados a vivir en un mundo que, aunque sujeto a los caprichos de los sucesos económicos o políticos, parece estable y fiable al menos en lo que respecta a sus propiedades físicas. A usted no le preocupa que los constituyentes atómicos del aire que está respirando ahora se disuelvan repentinamente, dejándole jadeante cuando manifiestan su carácter ondulatorio cuántico rematerializándose en el lado oculto de la Luna. Y usted tiene razón en no preocuparse por esto, porque según la mecánica cuántica la probabilidad de que suceda, aunque

no nula, es absurdamente pequeña. Pero ¿qué hace tan pequeña a la probabilidad?

Hay dos razones principales. Primera, en una escala fijada por átomos, la Luna está enormemente lejos. Y, como se ha mencionado, en muchas circunstancias (aunque no en todas), las ecuaciones cuánticas muestran que una onda de probabilidad tiene típicamente un valor apreciable en una región pequeña del espacio y rápidamente cae casi a cero cuando uno se aleja de dicha región (como en la figura 4.5). De modo que la probabilidad de que incluso un único electrón que usted espera que esté en la misma habitación que está usted— como uno de los que usted acaba de exhalar —se encuentre en un momento en el lado oculto de la Luna, aunque no cero, es extraordinariamente pequeña. Tan pequeña que hace que la probabilidad de que usted se case con Nicole Kidman o con Antonio Banderas parezca enorme en comparación. En segundo lugar, hay un montón de electrones, tantos como protones y neutrones, que forman el aire de su habitación. La probabilidad de que todas estas partículas hagan lo que es extraordinariamente poco probable incluso para una es tan pequeña que apenas vale la pena dedicarle un momento de reflexión. Sería no sólo como casarse con su estrella de cine favorita, sino ganar también todas las loterías todas las semanas durante un período de tiempo que haría que la edad actual del universo parezca un simple parpadeo cósmico.

Esto da un sentido a por qué no encontramos directamente los aspectos probabilistas de la mecánica cuántica en la vida cotidiana. De todas formas, puesto que los experimentos confirman que la mecánica cuántica describe la física fundamental, ella presenta un asalto frontal a nuestras creencias básicas acerca de lo que constituye la realidad. Einstein, en particular, estaba profundamente molesto por el carácter probabilista de la

teoría cuántica. La física, decía una y otra vez, se dedica a determinar con certeza qué ha sucedido, qué está sucediendo y qué sucederá en el mundo a nuestro alrededor. Los físicos no son contables, y la física no es el negocio de calcular probabilidades. Pero Einstein no podía negar que la mecánica cuántica era enormemente acertada para explicar y predecir, aunque en un marco estadístico, las observaciones experimentales del micromundo. Y por eso, más que intentar demostrar que la mecánica cuántica estaba equivocada, una tarea que aún parece el sueño de un loco a la luz de sus éxitos sin paralelo, Einstein dedicó mucho esfuerzo a tratar de mostrar que la mecánica cuántica no era la última palabra sobre cómo funciona el universo. Incluso si no podía saber cuál era, Einstein trataba de convencer a todos de que había una descripción más profunda y menos extraña del universo aún por encontrar.

A lo largo de muchos años, Einstein acumuló una serie de desafíos cada vez más sofisticados con el objetivo de mostrar lagunas de la estructura de la mecánica cuántica. Uno de estos desafíos, planteado en 1927 en la Quinta Conferencia de Física del Instituto Solvay,[4.8] concierne al hecho de que incluso si la onda de probabilidad de un electrón podría parecerse a la de la figura 4.5, cuando quiera que medimos el paradero del electrón siempre lo encontramos en una posición definida u otra. Así, preguntaba Einstein, ¿no significa eso que la onda de probabilidad es meramente un sucedáneo temporal para una descripción más precisa —aún por descubrir— que prediría con certeza la posición del electrón? Después de todo, si se encuentra el electrón en X, ¿no significa eso, en realidad, que estaba en o muy cerca de X un instante antes de que se hiciera la medida? Y si es así, seguía Einstein, el hecho de que la mecánica cuántica dependa de la onda de probabilidad —una onda que, en este ejemplo, dice que el

electrón tenía una probabilidad de haber estado lejos de X— ¿no es reflejo de la inadecuación de la teoría para describir la verdadera realidad subyacente?

El punto de vista de Einstein es simple y atractivo. ¿Qué podría ser más natural que esperar que una partícula esté localizada en o, al menos, muy cerca de donde es encontrada un instante después? Si éste es el caso, una comprensión más profunda de la física debería proporcionar esa información y prescindir de la herramienta más grosera de las probabilidades. Pero el físico danés Niels Bohr y su séquito de defensores de la mecánica cuántica discrepaban. Tal razonamiento, argumentaban, está enraizado en el pensamiento convencional según el cual cada electrón sigue un camino único y definido cuando va de un lado a otro. Y este pensamiento es fuertemente cuestionado por la figura 4.4, puesto que si cada electrón siguiera un camino definido —como la imagen clásica de una bala disparada desde una pistola— sería extraordinariamente difícil explicar la figura de interferencia observada: ¿qué estaría interfiriendo con qué? Las balas ordinarias disparadas de una en una desde una única pistola no pueden interferir, de modo que si los electrones viajaran como balas, ¿cómo explicaríamos la figura de la figura 4.4?

Pero según Bohr y la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica que él defendió enérgicamente, antes de que uno mida la posición del electrón ni siquiera tiene sentido preguntar dónde está. No tiene una posición definida. La onda de probabilidad codifica la probabilidad de que el electrón, cuando se examina adecuadamente, sea encontrado aquí o allí, y eso es todo lo que puede decirse sobre su posición. Punto. El electrón tiene una posición definida, en el sentido intuitivo habitual, sólo en el momento en que lo «miramos» —en el momento en que medimos su posición— e identificamos su localización con certeza. Pero

antes (y después) de que lo hagamos, todo lo que tiene son posiciones potenciales descritas por una onda de probabilidad que, como cualquier onda, está sujeta a efectos de interferencia. No es que el electrón tenga una posición y que nosotros no la conozcamos antes de hacer nuestra medida. Más bien, contrariamente a lo que usted hubiera esperado, el electrón sencillamente no tiene una posición definida antes de que se haga la medida.

Ésta es una realidad radicalmente extraña. En este punto de vista, cuando medimos la posición del electrón no estamos midiendo una característica objetiva y preexistente de la realidad. Más bien, el acto de medida está profundamente implicado en crear la propia realidad que está midiendo. Llevando esto desde los electrones a la vida cotidiana, Einstein bromeaba: «¿Realmente cree usted que la Luna no está allí cuando nadie la mira?». Los defensores de la mecánica cuántica respondían con una versión de la vieja historia de un árbol que cae en un bosque: si nadie está mirando la Luna —si nadie «está midiendo su localización por el hecho de verla»— no hay ninguna forma de que sepamos si está allí, de modo que no tiene sentido plantear la pregunta. Einstein encontraba esto profundamente insatisfactorio. Estaba totalmente reñido con su concepción de la realidad; él creía firmemente que la Luna está allí, ya esté alguien mirándola o no. Pero los incondicionales cuánticos no estaban convencidos.

El segundo desafío de Einstein, planteado en la Conferencia Sol-vay de 1930, seguía de cerca al primero. Él describió un aparato hipotético que (mediante una inteligente combinación de una báscula, un reloj y un obturador) parecía establecer que una partícula tal como un electrón debía tener propiedades definidas —antes de ser medida

o examinada— que según la mecánica cuántica no podía tener. Los detalles no son esenciales pero la resolución es particularmente irónica. Cuando Bohr supo del desafío de Einstein, casi se cayó de espaldas —al principio, no podía ver ningún fallo en el argumento de Einstein—. Pero en unos días se recuperó y refutó por completo la afirmación de Einstein. Y lo sorprendente es que la clave de la respuesta de Bohr estaba en la relatividad general. Bohr se dio cuenta de que Einstein no había considerado su propio descubrimiento de que la gravedad deforma el tiempo —que un reloj marcha a un ritmo que depende del campo gravitatorio que experimenta—. Cuando se incluyó esta complicación en el argumento, Einstein se vio obligado a admitir que sus conclusiones encajaban perfectamente con la teoría cuántica ortodoxa.

Incuso si sus objeciones fueron desbaratadas, Einstein siguió sintiéndose profundamente incómodo con la mecánica cuántica. En los años siguientes mantuvo en guardia a Bohr y sus colegas, planteando un nuevo desafío tras otro. Su ataque más potente y de mayor alcance se centró en algo conocido como el principio de incertidumbre, una consecuencia directa de la mecánica cuántica enunciada en 1927 por Wemer Heisenberg.

Heisenberg y la incertidumbre

El principio de incertidumbre proporciona una medida precisa y cuantitativa de cómo está tejida la probabilidad en el tejido de un universo cuántico. Para entenderlo, pensemos en los menús de precio fijo en algunos restaurantes chinos. Los platos están dispuestos en dos columnas, A y B, y si, por ejemplo, usted pide el primer plato en la columna A no se le permite pedir el primer plato

en la columna B; si usted pide el segundo plato en la columna A, no se le permite pedir el segundo plato en la columna B, y así sucesivamente. De esta manera, el restaurante ha establecido un dualismo dietario, una complementariedad culinaria (una, en particular, que está diseñada para impedir escoger los platos más caros). En el menú de precio fijo usted puede tener pato pequinés o langosta cantonesa, pero no ambos.

El principio de incertidumbre de Heisenberg es similar. Dice, hablando en términos generales que las características físicas del dominio microscópico (posiciones de partículas, velocidades, energías, momentos angulares y demás) pueden dividirse en dos listas, A y B. Y como Heisenberg descubrió, el conocimiento de la primera característica de la lista A compromete fundamentalmente su capacidad para tener conocimiento de la primera característica de la lista B; el conocimiento de la segunda característica de la lista A compromete fundamentalmente su capacidad para tener conocimiento de la segunda característica de la lista B; y así sucesivamente. Además, como si estuviese permitido que un plato contenga algo de pato pequinés y algo de langosta cantonesa, pero sólo en proporciones que sumen el mismo precio total, cuanto más preciso es su conocimiento de una característica de una lista, menos preciso puede ser su conocimiento de la correspondiente característica de la segunda lista. La incapacidad fundamental para determinar simultáneamente todas las características de ambas listas —determinar con certeza todas estas características del dominio microscópico — es la incertidumbre revelada por el principio de Heisenberg.

Como ejemplo, cuanto más precisamente conoce usted dónde está una partícula, menos precisamente puede conocer su velocidad. Análogamente, cuanto más

precisamente conoce con qué rapidez se está moviendo una partícula, menos puede saber acerca de dónde está. La teoría cuántica establece con ello su propia dualidad: usted puede determinar con precisión ciertas características físicas del dominio microscópico, pero al hacerlo elimina la posibilidad de determinar con precisión algunas otras características complementarias.

Para entender por qué, sigamos una descripción aproximada elaborada por el propio Heisenberg que, aunque incompleta en aspectos particulares que discutiremos, da una útil imagen intuitiva. Cuando medimos la posición de cualquier objeto, generalmente interaccionamos con él de alguna manera. Si buscamos el interruptor de luz en una habitación oscura, sabemos que lo hemos localizado cuando lo tocamos. Pero si un murciélago está buscando un ratón de campo, lanza señales de sonar para que reboten en su blanco e interpreta la onda reflejada. El ejemplo más común de todo esto es localizar algo viéndolo, recibiendo luz que se ha reflejado en el objeto y entra en nuestros ojos. El punto clave es que estas interacciones no sólo nos afectan a nosotros, sino que afectan también al objeto cuya posición se está determinando. Incluso la luz que rebota en un objeto le da un minúsculo empujón. Ahora bien, para los objetos cotidianos tales como el libro que usted tiene en las manos o un reloj de pared, el pequeñísimo empujón de la luz que rebota no tiene efecto apreciable. Pero cuando golpea a una partícula minúscula como un electrón sí tiene un gran efecto: cuando la luz rebota en el electrón, cambia la velocidad del electrón, de forma muy parecida a como la velocidad con que usted se mueve queda afectada por un fuerte viento que bate una esquina de una calle. De hecho, cuanto más exactamente quiera usted identificar la posición del electrón, más estrechamente definida y más energética

tiene que ser la luz, dando un efecto aún mayor al momento del electrón.

Esto significa que si usted mide la posición de un electrón con alta precisión, necesariamente contamina su propio experimento: el acto de medida de la posición perturba la velocidad del electrón. Por consiguiente, usted puede saber dónde está el electrón exactamente, pero no puede saber también exactamente con qué rapidez se estaba moviendo en ese instante. Recíprocamente, usted puede medir exactamente con qué rapidez se está moviendo un electrón, pero al hacerlo contaminará su capacidad para determinar con precisión su posición. La Naturaleza tiene un límite intrínseco sobre la precisión con la que pueden determinarse tales características complementarias. Y aunque nos estamos centrando en los electrones, el principio de incertidumbre es completamente general: se aplica a todo.

En la vida cotidiana hablamos rutinariamente de cosas tales como un automóvil que pasa una señal de Stop particular (posición) mientras viaja a 150 kilómetros por hora (velocidad), especificando como si tal cosa estas dos características físicas. En realidad, la mecánica cuántica dice que este enunciado no tiene un significado preciso puesto que usted no puede nunca medir simultáneamente una posición definida y una velocidad definida. La razón de que sigamos con tales descripciones incorrectas del mundo físico es que en las escalas cotidianas la cantidad de incertidumbre implicada es minúscula, y en general pasa desapercibida. Ya ve usted que el principio de Heisenberg no sólo declara incertidumbre, sino que también especifica —con completa certeza— la mínima cantidad de incertidumbre en cada situación. Si aplicamos esta fórmula a la velocidad de su automóvil cuando pasa por una señal de Stop cuya posición es conocida con un margen de un

centímetro, entonces la incertidumbre en la velocidad resulta ser sólo de una trillonésima de trillonésima de kilómetro por hora. Un policía estaría perfectamente acorde con las leyes de la física cuántica si afirmara que su velocidad estaba entre 149,999999999999999999999999999999999999 y 90,000000000000000000000000000000000001 kilómetros por hora cuando usted se pasó la señal de Stop; demasiado para una posible defensa del principio de incertidumbre. Pero si nosotros reemplazáramos su automóvil masivo por un electrón delicado cuya posición conociéramos con un margen menor de una milmillonésima de metro, entonces la incertidumbre en su velocidad sería de 150.000 kilómetros por hora. La incertidumbre está siempre presente, pero se hace importante sólo a escalas microscópicas.

La explicación de la incertidumbre como algo que surge a través de la inevitable perturbación causada por el proceso de medida ha ofrecido a los físicos una guía intuitiva útil, así como una herramienta explicatoria poderosa en ciertas situaciones específicas. Sin embargo, también puede ser equívoca. Puede dar la impresión de que la incertidumbre aparece sólo cuando los experimentadores se enfrentan con los objetos. Esto no es cierto. La incertidumbre está incorporada en la estructura de ondas de la mecánica cuántica y existe realicemos o no alguna medida. Como ejemplo, echemos una mirada a una onda de probabilidad particularmente simple de una partícula, el análogo de una onda en el océano, mostrada en la figura 4.6. Puesto que todas las crestas se están moviendo uniformemente hacia la derecha, usted podría conjeturar que esta onda describe una partícula que se mueve con la velocidad de las crestas de la onda; los experimentos confirman esta suposición. Pero ¿dónde está la partícula? Puesto que la onda está uniformemente extendida por el espacio, no tenemos

ninguna manera de decir que el electrón está aquí o allí. Cuando se mida, podría ser encontrado literalmente en cualquier parte. Así, aunque sabemos exactamente con qué rapidez se está moviendo la partícula, hay una enorme incertidumbre sobre su posición. Y como usted ve, esta conclusión no

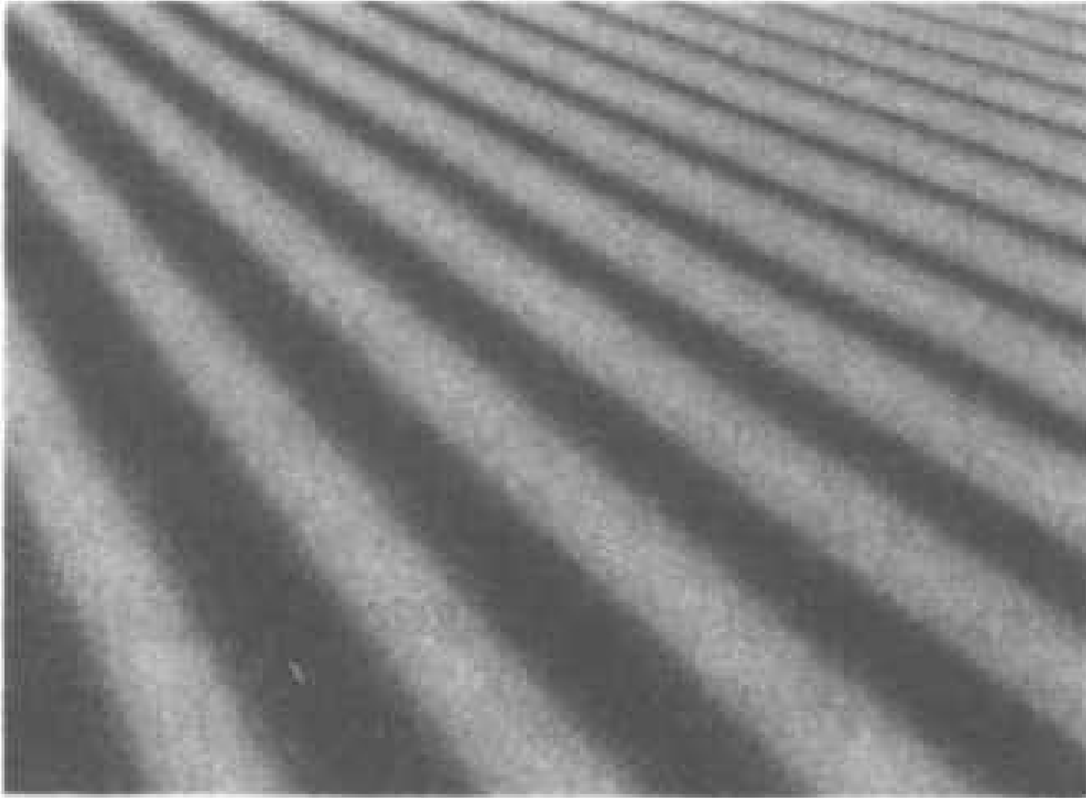


FIGURA 4.6. Una onda de probabilidad con una sucesión uniforme de crestas y valles representa una partícula con una velocidad definida. Pero puesto que las crestas y valles están uniformemente distribuidos, la posición de la partícula está completamente indeterminada. Tiene la misma probabilidad de estar en cualquier parte.

depende de que perturbemos la partícula. Nunca la tocamos. Más bien se basa en una característica básica de las ondas: pueden dispersarse.

Aunque los detalles se hacen más complicados, un razonamiento similar se aplica a todas las otras formas de onda, de modo que la lección general es clara. En mecánica cuántica, la incertidumbre simplemente es.

Einstein, la incertidumbre y la cuestión de la realidad

Una pregunta importante, que quizá ya se le haya ocurrido, es si el principio de incertidumbre es un enunciado sobre lo que podemos saber sobre la realidad o es un enunciado sobre la propia realidad. Los objetos que forman el universo ¿tienen realmente una posición y una velocidad, como nos dice nuestra imagen clásica habitual de casi todo —una bola de béisbol que se eleva, un corredor haciendo footing, un girasol que sigue lentamente el movimiento del Sol en el cielo— aunque la incertidumbre cuántica nos diga que estas características de la realidad están para siempre más allá de nuestra capacidad de conocerlas simultáneamente, incluso en principio? ¿O la incertidumbre cuántica rompe por completo el molde clásico, y nos dice que la lista de atributos que nuestra intuición clásica asigna a la realidad, una lista encabezada por las posiciones y las velocidades de los ingredientes que constituyen el mundo, está equivocada? ¿Nos dice la incertidumbre cuántica que la partícula sencillamente no posee una posición definida y una velocidad definida en un instante dado?

Para Bohr, esta pregunta recordaba un koan zen. La física trata sólo de cosas que podemos medir. Desde el punto de vista de la física, eso es la realidad. Tratar de utilizar la física para examinar una realidad «más profunda», una realidad más allá de lo que podemos conocer a través de medidas, es como pedir a la física que analice el sonido de una sola mano aplaudiendo. Pero en 1935, Einstein, junto con dos colegas, Boris Podolsky y Nathan Rosen, planteó esta cuestión de una forma tan firme e inteligente que lo que había empezado como el aplauso de una mano reverberó durante cincuenta años hasta convertirse en un aplauso atronador que anunciaba un asalto a nuestra comprensión de la realidad mucho mayor que lo que Einstein había imaginado nunca.

El artículo Einstein-Podolsky-Rosen pretendía demostrar que la mecánica cuántica, aunque sin duda acertada al hacer predicciones y explicar datos, no podía ser la última palabra con respecto a la física del microcosmos. Su estrategia era sencilla, y estaba basada en las cuestiones recién planteadas: ellos querían demostrar que toda partícula posee una posición definida y una velocidad definida en cualquier instante de tiempo dado, y con ello querían concluir que el principio de incertidumbre revela una limitación fundamental del enfoque mecanocuántico. Si toda partícula tiene una posición y una velocidad, pero la mecánica cuántica no puede tratar con estas características de la realidad, entonces la mecánica cuántica sólo proporciona una descripción parcial del universo. La mecánica cuántica, pretendían demostrar, era por lo tanto una teoría incompleta de la realidad física, y, quizá, meramente un jalón hacia una herramienta más profunda que esperaba a ser descubierta. En realidad, como veremos, pusieron el pavimento para demostrar algo incluso más espectacular: la no localidad del mundo cuántico.

Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) fueron inspirados en parte por la explicación aproximada que daba Heisenberg del principio de incertidumbre: cuando se mide dónde está algo, necesariamente se perturba, contaminando así cualquier intento de determinar simultáneamente su velocidad. Aunque, como hemos visto, la incertidumbre cuántica es más general que lo que indica esta explicación basada en la «perturbación», Einstein, Podolsky y Rosen idearon lo que parecía ser un rodeo convincente e inteligente que evitaba cualquier fuente de incertidumbre. ¿Qué pasa si usted pudiera realizar una medida indirecta de la posición y la velocidad de una partícula de un modo que nunca le ponga en contacto con la propia partícula? Por ejemplo, utilizando una analogía clásica, imagine que Rod y

Todd Flanders deciden hacer una caminata en solitario por el recién creado Desierto Nuclear en Springfield. Ellos empiezan espalda contra espalda en el centro del desierto y acuerdan caminar en línea recta, en direcciones opuestas, a la misma velocidad preacordada. Imagine además que, nueve horas después, su padre, Ned, al volver de su paseo por el monte Springfield, ve a Rod, corre tras él y le pregunta desesperadamente por el paradero de Todd. Bien, en ese instante, Todd está muy lejos, pero aun así, preguntando y observando a Rod, Ned puede aprender mucho sobre Todd. Si Rod está exactamente a 50 kilómetros al este de la posición de partida, Todd debe estar exactamente a 50 kilómetros al oeste de la posición de partida. Si Rod está andando a exactamente 5 kilómetros por hora hacia el este, Todd debe estar andando a exactamente 5 kilómetros por hora hacia el oeste. De este modo, incluso si Todd está a 100 kilómetros, Ned puede determinar su posición y velocidad, aunque sea indirectamente.

Einstein y sus colegas aplicaron una estrategia similar al dominio cuántico. Hay procesos físicos bien conocidos en los que dos partículas emergen de una misma localización con propiedades que están relacionadas de una forma muy parecida al movimiento de Rod y Todd. Por ejemplo, si una única partícula inicial se desintegrara en dos partículas de la misma masa que salen despedidas «espalda contra espalda» (como dos fragmentos que salen despedidos de una explosión en direcciones opuestas), algo que es habitual en el dominio de la física de partículas subatómicas, las velocidades de los dos constituyentes serán iguales y opuestas. Además, las posiciones de las dos partículas constituyentes estarán también estrechamente relacionadas, y por simplicidad se puede pensar que las partículas están siempre equidistantes de su origen común.

Una diferencia importante entre el ejemplo clásico que implica a Rod y Todd y la descripción cuántica de las dos partículas es que, aunque podemos decir con certeza que hay una relación definida entre las velocidades de las dos partículas —si se midiera una y se encontrara que se está moviendo hacia la derecha a una velocidad dada, entonces la otra se estaría moviendo necesariamente hacia la izquierda a la misma velocidad— no podemos predecir el valor numérico real de la velocidad con la que se mueven las partículas. En su lugar, lo más que podemos hacer es utilizar las leyes de la física cuántica para predecir la probabilidad de que se alcance cualquier velocidad concreta. Análogamente, aunque podemos decir con certeza que hay una relación definida entre las posiciones de las partículas —si se mide una en un instante dado y se encuentra que está en cierta localización, la otn> está necesariamente localizada a la misma distancia del punto de partida pero en dirección contraria— no podemos predecir con certeza la localización real de ninguna de las partículas. En su lugar, lo más que podemos hacer es predecir la probabilidad de que una de las partículas esté en una localización dada. Así pues, aunque la mecánica cuántica no da respuestas definidas con respecto a las velocidades o las posiciones de la partícula, en ciertas situaciones sí da enunciados definitivos respecto a las relaciones entre las velocidades y posiciones de las partículas.

Einstein, Podolsky y Rosen trataron de explotar estas relaciones para demostrar que cada una de las partículas tiene realmente una posición definida y una velocidad definida en todo instante de tiempo. He aquí cómo: imagínese que mide la posición de la partícula que se mueve hacia la derecha y de esta manera aprende, indirectamente, la posición de la partícula que se mueve

hacia la izquierda. EPR argumentaban que puesto que usted no le ha hecho nada, absolutamente nada, a la partícula que se mueve hacia la izquierda, ésta debe haber tenido esta posición, y todo lo que usted ha hecho es determinarla, aunque indirectamente. Luego ellos señalaban inteligentemente que en su lugar usted podía haber decidido medir la velocidad de la partícula que se mueve hacia la derecha. En este caso usted habría determinado, indirectamente, la velocidad de la partícula que se mueve hacia la izquierda sin perturbarla en absoluto. Una vez más, EPR argumentaban que puesto que usted no habría hecho nada, absolutamente nada, a la partícula que se mueve hacia la izquierda, ésta debe haber tenido esta velocidad, y todo lo que usted habría hecho es determinarla. Juntando ambas cosas —la medida que usted hizo y la medida que podía haber hecho— EPR concluían que la partícula que se mueve hacia la izquierda tiene una posición definida y una velocidad definida en cualquier instante dado.

Como esto es sutil y crucial, déjeme decirlo de nuevo. EPR razonaban que nada en su acto de medir la partícula que se mueve hacia la derecha podía tener ningún efecto sobre la partícula que se mueve hacia la izquierda, porque son entidades separadas y lejanas. La partícula que se está moviendo hacia la izquierda es totalmente ajena a lo que usted ha hecho o podría haber hecho a la partícula que se mueve hacia la derecha. Las partículas podrían estar a metros, kilómetros o años luz de distancia cuando usted hace sus medidas en la partícula que se mueve hacia la derecha, de modo que, en resumen, la partícula que se mueve hacia la izquierda no podría preocuparse de lo que usted hace. Así pues, cualquier propiedad de la partícula que se mueve hacia la izquierda que usted aprende realmente, o podría aprender en principio, a partir del estudio de su contrapartida que se mueve hacia la derecha,

debe ser una propiedad existente y definida de la partícula que se mueve hacia la izquierda, totalmente independiente de su medida. Y puesto que si usted hubiera medido la posición de la partícula derecha habría aprendido la posición de la partícula izquierda, y si usted hubiera medido la velocidad de la partícula derecha habría aprendido la velocidad de la partícula izquierda, debe ser que la partícula que se mueve hacia la izquierda tiene realmente una posición y una velocidad definida a la vez. Por supuesto, toda esta discusión podría hacerse intercambiando los papeles de las partículas que se mueven hacia la izquierda y hacia la derecha (y, de hecho, antes de hacer cualquier medida ni siquiera podemos decir qué partícula se está moviendo hacia la izquierda y cuál se está moviendo hacia la derecha); esto lleva a la conclusión de que ambas partículas tienen posiciones y velocidades diferentes.

Así pues, EPR concluían que la mecánica cuántica es una descripción incompleta de la realidad. Las partículas tienen posiciones y velocidades definidas, pero el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica muestra que estas características de la realidad están más allá de los límites de lo que la teoría puede manejar. Si, de acuerdo con estos y muchos otros físicos, usted cree que una teoría completa de la Naturaleza debería describir cada atributo de la realidad, el fracaso de la mecánica cuántica para describir a la vez las posiciones y las velocidades de las partículas significa que pasa por alto algunos atributos, y por consiguiente no es una teoría completa; no es la última palabra. Eso es lo que Einstein, Podolsky y Rosen argumentaban vigorosamente.

La respuesta cuántica

Aunque EPR concluían que toda partícula tiene una posición y una velocidad definidas en cualquier instante dado, note que si usted sigue su procedimiento quedará muy lejos de determinar realmente estos atributos. Dije antes que usted podría haber decidido medir la velocidad de la partícula que se mueve hacia la derecha. Si lo hubiera hecho, habría perturbado su posición; por el contrario, si hubiera decidido medir su posición habría perturbado su velocidad. Si usted no tiene a mano ambos atributos de la partícula que se mueve hacia la derecha, tampoco los tiene de la partícula que se mueve hacia la izquierda. Así pues, no hay conflicto con el principio de incertidumbre'. Einstein y sus colaboradores reconocían abiertamente que no podían identificar a la vez la posición y la velocidad de cualquier partícula dada. Pero, y ésta es la clave, incluso sin determinar a la vez la posición y la velocidad de una u otra de las partículas, el razonamiento de EPR muestra que cada una tiene una posición y una velocidad definidas. Para ellos se trataba de una cuestión de realidad. Para ellos, una teoría no podía afirmar que es completa si hubiera elementos de realidad que no podía describir.

Tras alguna agitación intelectual en respuesta a esta observación inesperada, los defensores de la mecánica cuántica se refugiaron en su aproximación pragmática habitual, bien resumida por el eminente físico Wolfgang Pauli: «El problema de si existe algo de lo que no se puede saber nada es parecido a la vieja pregunta de cuántos ángeles caben en la punta de un alfiler. Uno no debería atormentarse el cerebro con el primero más de lo que lo hace con la segunda». **[4.9]** La física en general, y la mecánica cuántica en particular, sólo pueden tratar de las propiedades medibles del universo. Cualquier otra cosa no está simplemente en el dominio de la física. Si no se puede medir a la vez la posición y la velocidad de una partícula,

entonces no tiene sentido hablar de si tiene a la vez una posición y una velocidad.

EPR discrepaban. La realidad, mantenían, era más que la lectura de detectores; era más que la suma total de todas las observaciones en un instante dado. Cuando nadie, absolutamente nadie, ningún aparato, ningún equipo, nada en absoluto está «mirando» la Luna, la Luna seguía estando allí. Ellos creían que seguía siendo parte de la realidad.

En cierto sentido, esta posición es reflejo del debate entre Newton y Leibniz sobre la realidad del espacio. ¿Puede algo ser considerado real ni no puede tocarse ni verse o medirse de alguna forma? En el capítulo 2 describí cómo el cubo de Newton cambió el carácter del debate del espacio, al sugerir de repente que una influencia del espacio podría ser observada directamente en la superficie curva del agua en rotación. En 1964, en un golpe sorprendente que un comentarista ha calificado como «el descubrimiento más profundo de la ciencia»,**[4.10]** el físico irlandés John Bell hizo lo mismo para el debate de la realidad cuántica.

En las cuatro secciones siguientes describiremos el descubrimiento de Bell, tratando de aclarar todo con un mínimo de tecnicismos. Sin embargo, incluso si la discusión utiliza un razonamiento menos sofisticado que calcular las probabilidades en un juego de dados, incluye un par de pasos que debemos describir y luego juntar. Dependiendo de cuál sea su gusto por el detalle, quizá llegue un punto en el que usted sólo quiera el remate final. Si es así, siéntase libre para saltar a la página 152, donde encontrará un resumen y una discusión de las conclusiones que se derivan del descubrimiento de Bell.

Bell y el espín

John Bell transformó la idea central del artículo Einstein-Podolsky-Rosen. De una especulación filosófica se convirtió en una pregunta que podía ser respondida por una medida experimental concreta. Sorprendentemente, todo lo que necesitaba para lograrlo era considerar una situación en la que no había solo dos propiedades —por ejemplo, posición y velocidad— que la incertidumbre cuántica nos impide determinar simultáneamente. Él demostró que si hay tres o más características que caen simultáneamente bajo el paraguas de la incertidumbre —tres o más características con la propiedad de que al medir una se contaminan las otras y por eso no se puede determinar nada sobre ellas— entonces hay un experimento para abordar la cuestión de la realidad. El más simple de tales ejemplos implica algo conocido como el espín.

Desde la década de 1920 los físicos han sabido que las partículas giran —ejecutan un movimiento rotacional parecido al de un balón de fútbol que va dando vueltas mientras se dirige a la portería—. Sin embargo, el giro de la partícula cuántica difiere de la imagen clásica en varios aspectos esenciales, y los principales para nosotros son los dos puntos siguientes. En primer lugar, las partículas— por ejemplo, electrones o fotones— sólo pueden girar en la dirección de las agujas del reloj o en dirección contraria a una velocidad invariable alrededor de cualquier eje particular; el eje de giro de una partícula puede cambiar de dirección pero su velocidad de rotación no puede aumentar ni disminuir. En segundo lugar, la incertidumbre cuántica aplicada al espín muestra que de la misma forma que no se puede medir simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula, tampoco se puede determinar simultáneamente el espín de una partícula alrededor de más de un eje. Por ejemplo, si un balón de fútbol está girando alrededor de un eje que apunta hacia el nordeste,

su giro es compartido entre un eje que apunta hacia el norte y un eje que apunta hacia el este —y mediante una medida adecuada, usted podría determinar la fracción de giro en tomo a cada eje—. Pero si usted mide el espín de un electrón alrededor de cualquier eje escogido aleatoriamente, nunca encontrará una cantidad de espín fraccionaria. Es como si la propia medida obligara al electrón a reunir todo su movimiento giratorio y dirigirlo en el sentido de las agujas o en sentido contrario alrededor del eje en el que usted se ha centrado casualmente. Además, debido a la influencia de su medida sobre el espín del electrón, usted pierde la capacidad de determinar cómo estaba girando alrededor de un eje horizontal, alrededor de un eje de delante a atrás, o alrededor de cualquier otro eje, anterior a su medida. Estas características del espín mecano-cuántico son difíciles de representar, y la dificultad ilustra los límites de las imágenes clásicas para revelar la verdadera naturaleza del mundo cuántico. De todas formas, las matemáticas de la teoría cuántica y décadas de experimentos nos aseguran que estas características del espín cuántico están más allá de cualquier duda.

La razón para introducir aquí el espín no es sumergirnos en las complejidades de la física de partículas. Más bien, el ejemplo del espín de una partícula proporcionará, dentro de un momento, un simple laboratorio para extraer maravillosas e inesperadas respuestas a la cuestión de la realidad. Es decir, ¿tiene simultáneamente una partícula una cantidad de espín definida alrededor de todos y cada uno de los ejes, aunque nunca podamos conocerla para más de un eje en un instante dado debido a la incertidumbre cuántica? ¿O el principio de incertidumbre nos dice algo diferente? ¿Nos dice, contrariamente a cualquier noción clásica de realidad, que una partícula simplemente no posee y no puede poseer tales propiedades simultáneamente?

¿Nos dice que una partícula reside en un estado de limbo cuántico, sin tener espín definido sobre ningún eje dado, hasta que alguien o algo lo mide, haciéndole volver a la realidad y alcanzar —con una probabilidad determinada por la teoría cuántica— un valor de espín concreto u otro (en dirección de las agujas del reloj o en dirección contraria) alrededor del eje seleccionado? Estudiando esta cuestión, esencialmente la misma que planteamos en el caso de posiciones y velocidades de partículas, podemos utilizar el espín para sondear la naturaleza de la realidad cuántica (y extraer respuestas que trascienden enormemente el ejemplo específico del espín). Veamos esto.

Como demostró explícitamente el físico David Bohm, **[4.11]** el razonamiento de Einstein, Podolsky y Rosen, puede extenderse fácilmente a la cuestión de si las partículas tienen espines definidos alrededor de todos y cualquiera de los ejes escogidos. He aquí cómo. Coloquemos dos detectores capaces de medir el espín de un electrón incidente, uno en el lado derecho del laboratorio y otro en el lado izquierdo. Dispongamos que dos electrones salgan espalda con espalda desde una fuente a mitad de camino entre los dos detectores, de tal modo que sus espines —en lugar de sus posiciones y velocidades como en nuestro ejemplo anterior— estén correlacionados. Los detalles de cómo se hace esto no son importantes; lo que es importante es que puede hacerse y, de hecho, puede hacerse fácilmente. La correlación puede ser dispuesta de modo que si los detectores izquierdo y derecho están montados para medir los espines a lo largo de ejes que apuntan en la misma dirección, ellos darán el mismo resultado: si los detectores están montados para medir el espín de sus respectivos electrones incidentes alrededor de un eje vertical y el detector izquierdo encuentra que el espín está en el sentido de las agujas, también lo hará el detector

derecho; si los detectores están montados para medir el espín a lo largo de un eje a 60° de la vertical y el detector izquierdo mide un espín en sentido contrario a las agujas, también lo hará el detector derecho, y así sucesivamente. Una vez más, en mecánica cuántica lo más que podemos hacer es predecir la probabilidad de que los detectores encuentren espín en el sentido de las agujas o en sentido contrario, pero podemos predecir con un 100 por 100 de certeza que encuentre lo que encuentre un detector, también lo encontrará el otro.
[*7]

El refinamiento de Bohm del argumento EPR es ahora, a todos los efectos, el mismo que era en la versión original que se centraba en posición y velocidad. La correlación entre los espines de las partículas nos permite medir indirectamente el espín alrededor de un eje de la partícula que se mueve hacia la izquierda midiendo el espín alrededor

de dicho eje de su compañera que se mueve hacia la derecha. Puesto que esta medida se hace en el extremo derecho del laboratorio, no puede influir de ningún modo a la partícula que se mueve hacia la izquierda. Por ello, la última debe haber tenido todo el tiempo el valor de espín que se acaba de determinar; todo lo que hicimos fue medirlo, aunque indirectamente. Además, puesto que podríamos haber escogido realizar esta medida en tomo a cualquier eje, la misma conclusión debe ser válida para cualquier eje: el electrón que se mueve hacia la izquierda debe tener un espín definido en tomo a todos y cada uno de los ejes, incluso si sólo podemos determinarlo explícitamente alrededor de un eje en un instante dado. Por supuesto, los papeles de izquierda y derecha pueden invertirse, lo que lleva a la conclusión de que cada partícula tiene un espín definido alrededor de cualquier eje. [4.12]

En esta fase, al no ver ninguna diferencia obvia con el ejemplo posición/velocidad, usted podría seguir el camino de Pauli y sentirse tentado a responder que no tiene sentido pensar en tales cuestiones. Si usted no puede medir realmente el espín en tomo a ejes diferentes, ¿qué sentido tiene preguntar si la partícula tiene en cualquier caso un espín definido —en el sentido de las agujas versus sentido contrario a las agujas— en tomo a cada uno? La mecánica cuántica, y con más generalidad la física, sólo está obligada a explicar características del mundo que puedan medirse. Y ni Bohm, ni Einstein, ni Podolsky ni Rosen habían argumentado que las medidas pueden hacerse. Lo que argumentaban es que las partículas poseen propiedades prohibidas por el principio de incertidumbre incluso si nunca podemos conocer explícitamente sus valores concretos. Tales propiedades han llegado a conocerse como propiedades ocultas, o más comúnmente, variables ocultas.

Aquí es donde John Bell lo cambió todo. Él descubrió que si una partícula tiene un espín definido en tomo a todos los ejes, incluso si realmente no se puede determinar el espín en tomo a más de uno, entonces hay consecuencias observables y comprobables de dicho espín.

Poniendo a prueba la realidad

Para hacemos una idea de la intuición de Bell, volvamos a Mulder y

Scully e imaginemos que cada uno de ellos ha recibido otro paquete, que contiene también cajas de titanio, pero con una importante característica nueva. **[4.13]** En lugar de tener una puerta, cada caja de titanio tiene tres: una arriba, una en un lado y otra delante. La carta que las acompaña les informa que la esfera dentro de cada caja escoge ahora

aleatoriamente entre emitir destellos rojos y destellos azules cuando se abre cualquiera de las tres puertas de la caja. Si se abriera una puerta diferente (la de arriba versus la lateral versus la frontal) en una caja dada, el color aleatoriamente seleccionado por la esfera podría ser diferente, pero una vez que una puerta se ha abierto y la esfera ha emitido un destello, no hay manera de determinar qué hubiera sucedido si se hubiera escogido otra puerta. (En la aplicación física, esta característica resume la incertidumbre cuántica: una vez que se mide una propiedad no se puede determinar nada sobre las otras.) Finalmente, la carta les dice que hay de nuevo una conexión misteriosa, un entrelazamiento extraño entre los dos conjuntos de cajas de titanio. Incluso si todas las esferas escogen aleatoriamente en qué color emitir destellos cuando se abre una de las tres puertas de sus cajas, si tanto Mulder como Scully abren casualmente la misma puerta de una caja con el mismo número, la carta predice que ambos verán el mismo color. Si Mulder abre la puerta de arriba de su caja 1 y ve azul, entonces la carta predice que Scully también verá azul si ella abre la puerta de arriba de su caja 1; si Mulder abre la puerta lateral de su caja 2 y ve rojo, entonces la carta predice que Scully también verá rojo si abre la puerta lateral de su caja 2, y así sucesivamente. De hecho, cuando Scully y Mulder abren las doce primeras cajas —acordando por teléfono qué puerta van a abrir en cada una— verifican las predicciones de la carta.

Aunque a Mulder y Scully se les está presentando una situación algo más complicada que antes, a primera vista parece que el mismo razonamiento que utilizó antes Scully se aplica ahora igualmente.

«Mulder», dice Scully, «éste es tan estúpido como el paquete de ayer. Tampoco ahora hay ningún misterio.

Sencillamente la esfera dentro de cada caja debe estar programada. ¿No lo ves?»

«Pero ahora hay tres puertas», advierte Mulder «de modo que la esfera no puede “saber” qué puerta escogeríamos para abrir, ¿no es verdad?»

«No es necesario», explica Scully. «Eso es parte de la programación. Mira, éste es un ejemplo. Coge la siguiente caja no abierta, la caja 37, y yo haré lo mismo. Imagina ahora por razón del argumento, que la esfera en mi caja 37 está programada, digamos, para emitir un destello rojo si se abre la puerta de arriba, emitir un destello azul si se abre la puerta lateral, y emitir un destello rojo si se abre la puerta frontal. Llamaré a este programa rojo, azul, rojo. Es evidente entonces que si quienquiera que nos está enviando este material ha introducido este mismo programa en tu caja 37, y si los dos abrimos la misma puerta, veremos un destello del mismo color. Esto explica “la conexión misteriosa”: si las cajas con el mismo número en nuestras colecciones respectivas han sido programadas con las mismas instrucciones, entonces veremos el mismo color si abrimos la misma puerta. ¡No hay ningún misterio!»

Pero Mulder no cree que las esferas estén programadas. Cree lo que dice la carta. Cree que las esferas están escogiendo aleatoriamente entre rojo y azul cuando se abre una de las puertas de su caja y con ello cree, fervientemente, que sus cajas y las de Scully tienen una misteriosa conexión de largo alcance.

¿Quién tiene razón? Puesto que no hay manera de examinar las esferas antes o durante la supuesta selección aleatoria de color (recordemos que cualquier manipulación hará que la esfera elija instantánea y aleatoriamente entre rojo y azul, confundiendo cualquier intento de investigar cómo funciona realmente), parece imposible demostrar definitivamente si es Scully o Mulder quien tiene razón.

Pero, notablemente, tras pensar un poco, Mulder se da cuenta de que hay un experimento que zanjará la cuestión por completo. El razonamiento de Mulder es simple, pero requiere un toque matemático más explícito que la mayoría de las cosas que hemos visto. Decididamente vale la pena tratar de seguir los detalles —que no son tantos— pero no se preocupe si algo de ello se le escapa; dentro de poco resumiremos la conclusión clave.

Mulder se da cuenta de que él y Scully sólo han considerado hasta ahora lo que sucede si cada uno de ellos abre la misma puerta en una caja con un número dado. Y, como dice con excitación a Scully después de llamarla de nuevo, hay mucho que aprender si no siempre escogen la misma puerta y, en su lugar, escogen aleatoria e independientemente qué puerta abrir en cada una de sus cajas.

«Mulder, por favor, déjame disfrutar de mis vacaciones. ¿Qué podemos aprender haciendo eso?»

«Bien, Scully, podemos determinar si tu explicación es correcta o errónea.»

«OK, tengo que oír eso.»

«Es simple», continúa Mulder. «Si tú tienes razón, entonces esto es lo que yo entiendo: si tú y yo escogemos independiente y aleatoriamente qué puerta abrir en una caja dada y registramos el color del destello que vemos, entonces, después de hacer esto con muchas cajas debemos encontrar que vimos el mismo color de destello más del 50 por 100 de las veces. Pero si no es así, si encontramos que no estamos de acuerdo en el color en más del 50 por 100 de las cajas, entonces tú no puedes tener razón.»

«¿Sí?, ¿cómo es eso?» Scully se está interesando un poco más.

«Bien» continúa Mulder. «He aquí un ejemplo. Supongamos que tienes razón, y que cada esfera actúa de acuerdo con un programa. Sólo por concretar, imaginemos que el programa para la esfera en una caja particular resulta ser azul, azul, rojo. Ahora, puesto que nosotros dos escogemos entre tres puertas, hay un total de nueve combinaciones de puertas posibles que podríamos seleccionar para abrir en esta caja. Por ejemplo, yo podría escoger la puerta de arriba de mi caja mientras tú podrías escoger la puerta lateral de tu caja; o yo podría escoger la puerta frontal y tú podrías escoger la puerta de arriba; y así sucesivamente.»

«Sí, por supuesto» salta Scully. «Si llamamos 1 a la puerta de arriba, 2 a la puerta lateral y 3 a la puerta frontal, entonces las nueve combinaciones de puertas posibles son simplemente (1,1), (1,2), (1,3), (2.1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3).»

«Sí, así es», continúa Mulder. «Ahora éste es el punto: nota que de estas nueve posibilidades cinco combinaciones de puertas —(1,1), (2.2), (3,3), (1,2), (2,1)— darán como resultado que veamos que las esferas de nuestras cajas emiten destellos del mismo color. Las primeras tres combinaciones de puertas son aquellas en las que casualmente escogemos la misma puerta, y como sabemos, eso siempre da como resultado que veamos el mismo color. Las otras dos combinaciones —(1,2) y (2,1)—, dan como resultado el mismo color porque el programa dicta que las esferas emitirán destellos del mismo color —azul— si se abre o bien la puerta 1 o bien la puerta 2. Ahora bien, puesto que 5 es más que la mitad de 9, esto significa que para más de la mitad —más del 50 por 100— de las combinaciones de puertas posibles que podríamos seleccionar para abrir, las esferas emitirán destellos del mismo color.»

«Pero espera», protesta Scully. «Eso es sólo un ejemplo de un programa concreto: azul, azul, rojo. En mi explicación propuse que cajas con diferentes números pueden tener, y generalmente tienen, programas diferentes.»

«En realidad eso no importa. La conclusión vale para todos los programas posibles. Mi razonamiento con el programa azul, azul, rojo sólo se basaba en el hecho de que dos de los colores en el programa eran el mismo, y por eso se sigue una conclusión idéntica para cualquier programa: rojo, rojo, azul, o rojo, azul, rojo, y todos los demás. Cualquier programa tiene que tener al menos dos colores iguales; los únicos programas que son realmente diferentes son aquellos en los que los tres colores son iguales: rojo, rojo, rojo y azul, azul, azul. Pero para las cajas con uno cualquiera de estos programas, obtendremos el mismo color del destello independientemente de qué puertas abramos, y por lo tanto la fracción global en la que estaríamos de acuerdo no hará más que aumentar. Así, si tu explicación es correcta y las cajas actúan según programas —incluso con programas que varían de una caja numerada a otra— debemos coincidir en el color que vemos más del 50 por 100 de las veces.»

Ese es el argumento. La parte difícil ha pasado. La conclusión es que hay un test para determinar si Scully tiene razón y cada esfera opera de acuerdo con un programa que determina definitivamente el color del destello dependiendo de qué puerta se abra. Si ella y Mulder deciden independiente y aleatoriamente cuál de las tres puertas en cada una de sus cajas abrir, y luego comparan los colores que ven —caja por caja numerada— deben encontrar acuerdo en más del 50 por 100 de las cajas. Puesto en el lenguaje de la física, como se hará en la próxima sección, la idea de Mulder no es otra que la intuición extraordinaria de John Bell.

La traducción de este resultado a la física es directa. Imaginemos que tenemos dos detectores, uno en el lado izquierdo del laboratorio y otro en el lado derecho, que miden el espín de una partícula incidente tal como un electrón, como en el experimento discutido en la penúltima sección. Los detectores requieren que usted escoja el eje (vertical, horizontal, de delante a atrás, o uno de los innumerables ejes que yacen entre éstos) a lo largo del cual se va a medir el espín; por simplicidad, imaginemos que tenemos detectores fijos que ofrecen sólo tres elecciones para los ejes. En cualquier realización del experimento, usted encontrará que el electrón incidente está girando o bien en el sentido de las agujas o en sentido contrario en tomo al eje que usted seleccionó.

Según Einstein, Podolsky y Rosen, cada electrón incidente proporciona al detector en el que entra lo que equivale a un programa: incluso si está oculto, incluso si usted no puede medirlo, EPR afirmaban que cada electrón tiene una cantidad de espín definida —o en el sentido de las agujas o en sentido contrario— en tomo a todos y cada uno de los ejes. Por lo tanto, cuando un electrón entra en un detector, el electrón determina definitivamente si usted medirá que su espín está en el sentido de las agujas o en sentido contrario en tomo a cualquiera que sea el eje que usted ha escogido. Por ejemplo, un electrón que está girando en el sentido de las agujas en tomo a cada uno de los tres ejes proporciona el programa sentido de las agujas, sentido de las agujas, sentido de las agujas-, un electrón que está girando en el sentido de las agujas en tomo a los dos primeros ejes y en sentido contrario en tomo al tercero proporciona el programa sentido de las agujas, sentido de las agujas, sentido contrario a las agujas, y así

sucesivamente. Para explicar la correlación entre los electrones que se mueven hacia la izquierda y los que se mueven hacia la derecha, Einstein, Podolsky y Rosen afirman simplemente que tales electrones tienen espines idénticos y por ello proporcionan a los detectores en los que entran programas idénticos. Así pues, si se escogen los mismos ejes para los detectores derecho e izquierdo, los detectores de espín encontrarán idénticos resultados.

Nótese que estos detectores de espín reproducen exactamente todo lo que encontraron Scully y Mulder, aunque con sustituciones sencillas: en lugar de escoger una puerta en una caja de titanio, estamos escogiendo un eje; en lugar de ver un destello rojo o azul, registramos un espín en el sentido de las agujas o en sentido contrario. Así, de la misma forma que abrir las mismas puertas en un par de cajas de titanio idénticamente numeradas da como resultado el mismo color de destello, escoger los mismos ejes en dos detectores da como resultado que se mida la misma dirección de espín. Asimismo, de la misma forma que abrir una puerta particular en una caja de titanio nos impide conocer con qué color hubiese emitido un destello si hubiéramos escogido otra puerta, medir el espín del electrón en torno a un eje particular nos impide, vía incertidumbre cuántica, conocer qué dirección de espín habríamos encontrado si hubiéramos escogido un eje diferente.

Todo lo anterior significa que el análisis de Mulder de cómo saber quién tiene razón se aplica a esta situación exactamente de la misma manera que se aplicaba al caso de las esferas alienígenas. Si EPR tienen razón y cada electrón tiene realmente un valor definido del espín en tomo a los tres ejes —si cada electrón proporciona un «programa» que determina definitivamente el resultado de cualquiera de las tres medidas de espín posible— entonces podemos

hacer la siguiente predicción. El examen de los datos recogidos de muchas realizaciones del experimento —realizaciones en las que el eje para cada detector es seleccionado aleatoria e independientemente—mostrará que más de la mitad de las veces los espines de los electrones coinciden, estando ambos en el sentido de las agujas o ambos en sentido contrario. Si los espines de los electrones no coinciden más de la mitad de las veces, entonces Einstein, Podolsky y Rosen están equivocados.

Este es el descubrimiento de Bell. Muestra que incluso si no se puede medir realmente el espín de un electrón en tomo a más de un eje —incluso si no se puede «leer» explícitamente el programa que se supone que suministra al detector en el que entra— esto no significa que tratar de saber si de todas formas tiene una cantidad de espín definida en tomo a más de un eje es equivalente a contar ángeles en la punta de un alfiler. Ni mucho menos. Bell encontró que hay una consecuencia verificable asociada con que una partícula tenga valores de espín definidos. Utilizando ejes a tres ángulos, Bell proporcionó una manera de contar los ángeles de Pauli.

No humo, sino fuego

Por si usted se ha perdido algunos de los detalles, resumamos dónde hemos llegado. Mediante el principio de incertidumbre de Heisenberg, la mecánica cuántica afirma que hay características del mundo —como la posición y la velocidad de una partícula, o el espín de una partícula en tomo a varios ejes— que no pueden tener valores definidos simultáneamente. Una partícula, según la teoría cuántica, no puede tener una posición definida y una velocidad definida; una partícula no puede tener un espín definido (en

el sentido de las agujas o en sentido contrario) en torno a más de un eje; una partícula no puede tener simultáneamente atributos definidos para cosas que están en lados opuestos de la divisoria de la incertidumbre. En su lugar, las partículas se mantienen en un limbo cuántico, en una mezcla borrosa, amorfa y probabilista de todas las posibilidades; sólo cuando se mide se selecciona un resultado definido de entre los muchos posibles. Evidentemente, ésta es una imagen de la realidad drásticamente diferente de la que pintaba la física clásica.

Siempre escéptico acerca de la mecánica cuántica, Einstein, junto con sus colegas Podolsky y Rosen, trató de utilizar este aspecto de la mecánica cuántica como un arma contra la propia teoría. EPR argumentaban que incluso si la mecánica cuántica no permite que tales propiedades sean determinadas simultáneamente, las partículas tienen valores definidos de la posición y la velocidad; las partículas tienen valores de espín definidos en tomo a todos los ejes; las partículas tienen valores definidos para todas las cosas prohibidas por la incertidumbre cuántica. EPR argumentaban así que la mecánica cuántica no puede manejar todos los elementos de la realidad física —no puede manejar la posición y la velocidad de una partícula; no puede manejar el espín de una partícula en tomo a más de un eje— y por lo tanto es una teoría incompleta.

Durante mucho tiempo, la cuestión de si EPR tenían razón o no pareció más una cuestión de metafísica que de física. Como decía Pauli, si no se pueden medir realmente propiedades prohibidas por la incertidumbre cuántica, ¿qué diferencia podría haber si, pese a todo, existen en un pliegue oculto de la realidad? Pero, de forma notable, John Bell encontró algo que se le había escapado a Einstein, a Bohr y todos los demás gigantes de la física teórica del siglo xx: encontró que la mera existencia de ciertas cosas,

incluso si están más allá de la medida o la determinación explícita, supone una diferencia, y una diferencia que puede comprobarse experimentalmente. Bell demostró que si EPR tuvieran razón, los resultados encontrados por dos detectores ampliamente separados que miden propiedades de partículas (espín alrededor de diversos ejes arbitrariamente escogidos, en la aproximación que hemos adoptado) tendrían que coincidir más del 50 por 100 de las veces.

Bell tuvo esta idea en 1964, pero en esa época no existía la tecnología para acometer los experimentos requeridos. A comienzos de la década de 1970 ya existía. Empezando con Stuart Freedman y John Clauser en Berkley, siguiendo con Edward Fry y Randall Thompson en Texas A&M, y culminando a principios de la década de 1980 con la obra de Aspect y colaboradores que trabajaban en Francia, se realizaron versiones cada vez más refinadas de estos experimentos. En el experimento de Aspect, por ejemplo, los dos detectores estaban colocados a 13 metros de distancia, y un contenedor de átomos de calcio excitados estaba situado a medio camino entre ellos. La física que entendemos bien muestra que cada átomo de calcio, cuando vuelve a su estado normal de menor energía, emitirá dos fotones, que viajan espalda contra espalda, cuyos espines están perfectamente correlacionados, como sucede en el ejemplo de los espines electrónicos correlacionados que hemos estado discutiendo. De hecho, en el experimento de Aspect, cuando los dos detectores están preparados para medir el espín en tomo al mismo eje, los espines medidos para los dos fotones están perfectamente alineados. Si se conectaran luces a los detectores de Aspect que emitiesen un destello rojo en respuesta a un espín en sentido de las agujas del reloj y un destello azul en respuesta a un espín en sentido contrario,

los fotones incidentes provocarían que los detectores emitieran destellos del mismo color.

Pero, y éste es el punto crucial, cuando Aspect examinó los datos de un gran número de realizaciones del experimento —datos en los que las medidas que hacían los detectores izquierdo y derecho no eran siempre las mismas, sino que se cambiaban aleatoria e independientemente de una realización a otra— él encontró que los detectores no coinciden más del 50 por 100 de las veces.

Este resultado es demoledor. Es el tipo de resultado que le debería dejar sin aliento. Pero por si no lo ha hecho, déjeme explicarlo de nuevo. Los resultados de Aspect muestran que el experimento —no la teoría, no la reflexión, sino la Naturaleza— probaba que Einstein, Podolsky y Rosen estaban equivocados. Y eso significa que tiene que haber algo erróneo en el razonamiento que utilizaron EPR para concluir que las partículas poseen valores definidos para propiedades —como valores de espín alrededor de distintos ejes-— para las que los valores definidos están prohibidos por el principio de incertidumbre.

Pero ¿dónde podían haberse equivocado? Bien, recordemos que Einstein, Podolsky y Rosen se basan en una hipótesis central: si en un instante dado usted puede determinar una propiedad de un objeto mediante un experimento hecho sobre otro objeto espacialmente lejano, entonces el primer objeto debe haber tenido siempre dicha propiedad. La lógica para esta hipótesis era simple y completamente razonable. Su medida se hacía aquí mientras que el primer objeto estaba allí. Los dos objetos estaban separados espacialmente, y por ello su medida no podía haber tenido ningún efecto sobre el primer objeto. Más exactamente, puesto que nada va más rápido que la velocidad de la luz, si su medida en un objeto llegara a causar de alguna manera un cambio en el otro —por

ejemplo, hacer que el otro adoptara un movimiento de rotación idéntico en tomo a un eje escogido— tendría que pasar un tiempo antes de que esto pudiera suceder, un tiempo al menos tan grande como el tiempo que necesitaría la luz para atravesar la distancia ente los dos objetos. Pero tanto en nuestro razonamiento abstracto como en los experimentos reales las dos partículas son examinadas por los detectores al mismo tiempo. Por consiguiente, sea lo que sea lo que aprendemos de la primera partícula al medir la segunda, debe ser una propiedad que la primera partícula poseía con total independencia de que hiciéramos la medida. En resumen, el núcleo del argumentó de Einstein, Podolsky y Rosen es que un objeto allí no tiene que preocuparse por lo que usted hace con otro objeto aquí.

Pero como acabamos de ver, este razonamiento lleva a la predicción de que los detectores deberían encontrar el mismo resultado más de la mitad de las veces, una predicción que queda refutada por los resultados experimentales. Nos vemos obligados a concluir que la hipótesis hecha por Einstein, Podolsky y Rosen, por muy razonable que parezca, no puede responder a la forma en que se comporta nuestro universo cuántico. Así pues, mediante este razonamiento indirecto pero cuidadosamente elaborado, los experimentos nos llevan a concluir que un objeto allí se preocupa por lo que usted hace con otro objeto aquí.

Incluso si la mecánica cuántica muestra que las partículas adquieren aleatoriamente esta o aquella propiedad cuando son medidas, aprendemos que la aleatoriedad puede tener vínculos a través del espacio. Pares de partículas adecuadamente preparadas —se denominan partículas entrelazadas— no adquieren sus propiedades medidas de forma independiente. Son como un par de dados mágicos, uno lanzado en Atlantic City y el otro

en Las Vegas, cada uno de los cuales da aleatoriamente un número u otro, pero tales que los dos se las arreglan de algún modo para coincidir siempre. Las partículas entrelazadas actúan de forma similar, excepto que no requieren magia. Las partículas entrelazadas, incluso si están espacialmente separadas, no actúan de forma autónoma.

Einstein, Podolsky y Rosen se proponían demostrar que la mecánica cuántica proporciona una descripción incompleta del universo. Medio siglo más tarde, ideas teóricas y resultados experimentales inspirados por su trabajo nos obligan a volver su análisis del revés y concluir que la parte más básica, intuitivamente razonable y clásicamente sensible de su razonamiento es errónea: el universo es no local. El resultado de lo que usted hace en un lugar puede estar ligado a lo que sucede en otro lugar, incluso si nada viaja entre los dos lugares —incluso si no hay tiempo suficiente para que nada pueda completar el viaje entre los dos lugares—. La sugerencia intuitivamente satisfactoria de Einstein, de Podolsky y de Rosen de que tales correlaciones de largo alcance aparecen meramente porque las partículas tienen propiedades definidas, preexistentes y correlacionadas queda descartada por los datos. Eso es lo que hace esto tan extraordinario. [4.14]

En 1997, Nicolás Gisin y su equipo en la Universidad de Ginebra llevaron a cabo una versión del experimento de Aspect en la que los dos detectores estaban situados a 11 kilómetros de distancia. Los resultados no cambiaban. En la escala microscópica de las longitudes de onda del fotón, 11 kilómetros es una distancia gigantesca. Para el caso, daría igual 11 millones de kilómetros u 11.000 millones de años luz. Hay todas las razones para creer que la correlación entre los fotones persistiría por muy separados que se coloquen los detectores.

Esto suena muy extraño. Pero hay ahora evidencia abrumadora a favor de este denominado entrelazamiento cuántico. Si dos fotones están entrelazados, la medida satisfactoria del espín de cualquiera de los fotones en tomo a un eje «fuerza» al otro fotón distante a tener el mismo espín en tomo al mismo eje; el acto de medir un fotón «obliga» al otro fotón, que puede estar a gran distancia, a salir de la niebla de probabilidad y adoptar un valor de espín definitivo —un valor que coincide precisamente con el espín de su compañero distante—. Y eso es algo ante lo que la mente se queda atónita. [*8]

Entrelazamiento y relatividad especial: la visión estándar

He puesto las palabras «fuerza» y «obliga» entre comillas porque aunque transmiten la sensación que anhela nuestra intuición clásica, su significado preciso en este contexto es crítico para saber si estamos o no asistiendo a más de una convulsión. Con sus definiciones cotidia-ñas, estas palabras evocan una imagen de causalidad volitiva: escogemos hacer algo aquí para provocar o forzar que un algo particular suceda allí. Si ésta fuera la descripción correcta de cómo están correlacionados los dos fotones, la relatividad especial estaría contra las cuerdas. Los experimentos muestran que desde el punto de vista de un experimentador en el laboratorio, en el preciso instante en que se mide un fotón el otro fotón adopta inmediatamente la misma propiedad de espín. Si algo estuviera viajando desde el fotón izquierdo al fotón derecho, para avisar al fotón derecho de que se había determinado el espín del fotón izquierdo mediante una medida, tendría que viajar entre ambos fotones

instantáneamente, en conflicto con la velocidad límite establecida por la relatividad especial.

El consenso entre los físicos es que este conflicto aparente con la relatividad especial es ilusorio. La razón intuitiva es que incluso si los dos fotones están espacialmente separados, su origen común establece un vínculo fundamental entre ellos. Aunque se alejan uno de otro y se hacen espacialmente separados, su historia los entreteje; incluso cuando están distantes, siguen formando parte de un sistema físico. De modo que no se trata realmente de que una medida sobre un fotón obligue a otro fotón distante a adoptar propiedades idénticas. Más bien, los dos fotones están tan íntimamente ligados que está justificado considerarlos —incluso si están espacialmente separados— como partes de una entidad física. Entonces podemos decir que una medida sobre esta única entidad —una entidad que contiene dos fotones— afecta a la entidad entera; es decir, afecta a ambos fotones a la vez.

Aunque esta imaginería puede hacer más fácil de tragar la conexión entre los fotones, tal como está es vaga: ¿qué significa realmente decir que dos cosas especialmente separadas son una? Un argumento más preciso es el siguiente. Cuando la relatividad especial dice que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz, el «nada» se refiere a la materia o la energía familiares. Pero lo que tenemos ahora es más sutil, porque no parece que ninguna materia ni energía esté viajando entre los dos fotones, y por ello no hay nada cuya velocidad tengamos que medir. No obstante, hay un modo de saber si hemos chocado frontalmente con la relatividad especial. Una característica común a la materia y la energía es que cuando viajan de un lugar a otro pueden transmitir información. Los fotones que viajan desde una emisora de radio a su receptor llevan información. Los electrones que

viajan por los cables de Internet hasta su ordenador llevan información. Así, en cualquier situación donde se supone que algo —incluso algo no identificado— ha viajado más rápido que la velocidad de la luz, un test sencillo es preguntar si ha transmitido, o al menos podía haberlo hecho, información. Si la respuesta es no, sigue el razonamiento estándar, entonces nada ha superado la velocidad de la luz, y la relatividad especial no se cuestiona. En la práctica éste es el test que suelen utilizar los físicos para determinar si algún proceso sutil ha violado las leyes de la relatividad especial. (Nadie ha sobrevivido a este test.) Apliquémoslo aquí.

¿Hay alguna forma en la que, midiendo el espín en tomo a un eje dado de los fotones que se mueven a la izquierda y hacia la derecha, podamos enviar información de uno a otro? La respuesta es no. ¿Por qué? Bien, el resultado encontrado en el detector izquierdo o en el derecho no es otra cosa que una secuencia aleatoria de resultados espín-en-sentido-de-las-agujas o espín-en-sentido-contrario, puesto que en cualquier realización dada hay la misma probabilidad de que la partícula se encuentre girando en un sentido o en otro. De ninguna manera podemos controlar o predecir el resultado de cualquier medida concreta. Así pues, no hay mensaje, no hay código oculto, no hay ninguna información en ninguna de estas dos listas aleatorias. La única cosa interesante sobre las dos listas es que son idénticas —pero eso no puede saberse hasta que las dos listas sean reunidas y comparadas por algún medio convencional más lento que la luz (fax, e-mail, llamada telefónica, etc.)—. El argumento estándar concluye así que aunque medir el espín de un fotón parece afectar instantáneamente al otro, ninguna información se transmite de uno a otro y la velocidad límite de la relatividad especial sigue en vigor. Los físicos dicen que los resultados del espín

están correlacionados —pero no están en una relación causa-a-efecto tradicional porque no hay nada que viaje entre los dos lugares distantes.

Entrelazamiento y relatividad especial: la visión contraria

¿Es así? ¿Está totalmente resuelto el conflicto potencial entre la no localidad de la mecánica cuántica y la relatividad especial? Es probable. Sobre la base de las consideraciones anteriores, la mayoría de los físicos lo resumen diciendo que hay una coexistencia armoniosa entre la relatividad especial y los resultados de Aspect sobre partículas entrelazadas. En pocas palabras, la relatividad especial sobrevive por un pelo. La mayoría de los físicos encuentran esto convincente, pero otros tienen una sensación persistente de que hay más en la historia.

A un nivel visceral yo siempre he compartido la visión de la coexistencia, pero no hay que negar que la cuestión es delicada. Al final, independientemente de qué palabras holísticas se utilicen o que falta de información se subraye, dos partículas ampliamente separadas, cada una de las cuales está gobernada por la aleatoriedad de la mecánica cuántica, permanecen de alguna manera suficientemente «en contacto» para que haga lo que haga una, la otra también lo haga instantáneamente. Y eso parece sugerir que un algo más-rápido-que-la-luz está actuando entre ellas.

¿Dónde estamos? No hay ninguna respuesta universalmente aceptada. Algunos físicos y filósofos han sugerido que para avanzar debemos reconocer que la discusión se ha centrado hasta ahora en un punto que no es el adecuado: el núcleo real de la relatividad especial, señalan correctamente, no es tanto que la luz fija una velocidad límite, sino que la velocidad de la luz es algo en lo que coinciden todos los observadores, independientemente de su propio movimiento. [4.16] Con más generalidad, el

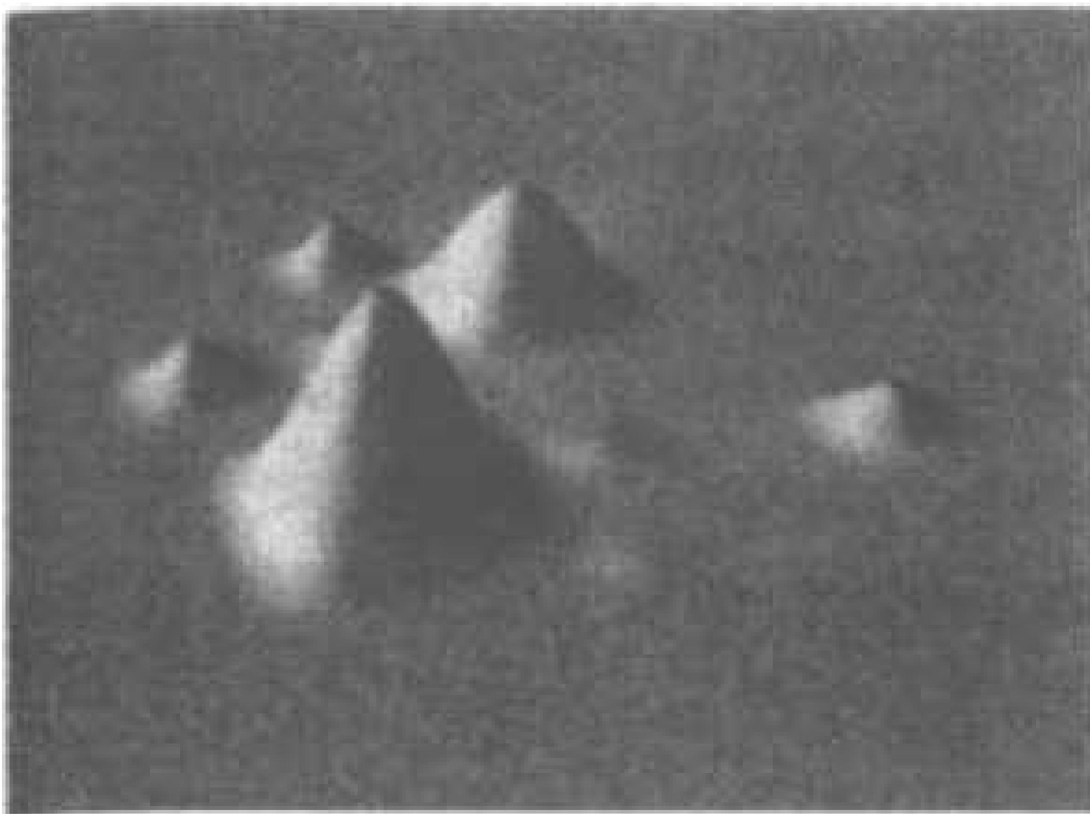
principio central de la relatividad especial es que ningún punto de vista observacional es preferido a cualquier otro. Así, estos investigadores proponen (y muchos otros están de acuerdo) que si el tratamiento igualitario de todos los observadores con velocidad constante pudiera hacerse compatible con los resultados experimentales con partículas entrelazadas, entonces desaparecería la tensión con la relatividad especial. [4.17] Pero conseguir este objetivo no es una tarea trivial. Para ver esto en concreto, pensemos en cómo explican el experimento de Aspect los buenos libros de texto de mecánica cuántica a la antigua usanza.

Según la mecánica cuántica estándar, cuando realizamos una medida y encontramos que una partícula está aquí provocamos que su onda de probabilidad cambie: el abanico previo de resultados potenciales se reduce al resultado real que encontramos en nuestra medida, como se ilustra en la figura 4.7. Los físicos dicen que la medida hace que la onda de probabilidad colapse e imaginan que cuanto mayor es la onda de probabilidad inicial en un lugar, mayor es la probabilidad de que la onda colapse a ese punto —es decir, mayor es la probabilidad de que la partícula sea encontrada en ese punto—. En la versión estándar el colapso sucede instantáneamente en todo el universo: una vez que uno encuentra la partícula aquí, dice el argumento, la probabilidad de que sea encontrada en cualquier otro lugar cae inmediatamente a cero, y esto se refleja en un colapso inmediato de la onda de probabilidad.

En el experimento de Aspect, cuando se mide el espín del fotón que se está moviendo hacia la izquierda y se encuentra, digamos, que es en sentido de las agujas del reloj en tomo a un eje, esto colapsa su onda de probabilidad en todo el espacio, haciendo instantáneamente que la parte en sentido contrario a las agujas sea cero. Puesto que este colapso ocurre en todas partes, ocurre también en la

posición del fotón que se mueve hacia la derecha. Y resulta que esto afecta a la parte en sentido contrario a las agujas de la onda de probabilidad del fotón que se mueve hacia la derecha, haciendo que también colapse a cero. Así, por muy lejos que esté el fotón que se mueve hacia la derecha del fotón que se mueve hacia la izquierda, su onda de probabilidad es afectada instantáneamente por la onda de probabilidad del fotón que se mueve hacia la izquierda, lo que asegura que tiene el mismo espín que el fotón que se mueve hacia la izquierda a lo largo del eje elegido. Así, en la mecánica cuántica estándar es este cambio instantáneo en las ondas de probabilidad el responsable de la influencia más rápida que la luz.

Las matemáticas de la mecánica cuántica hacen precisa esta discusión cualitativa. Y, de hecho, las influencias de largo alcance que aparecen de las ondas de probabilidad que colapsan cambian la predicción de con qué frecuencia los detectores izquierdo y derecho de Aspect (cuando sus ejes son escogidos aleatoria e independientemente) deberían encontrar el mismo resultado.



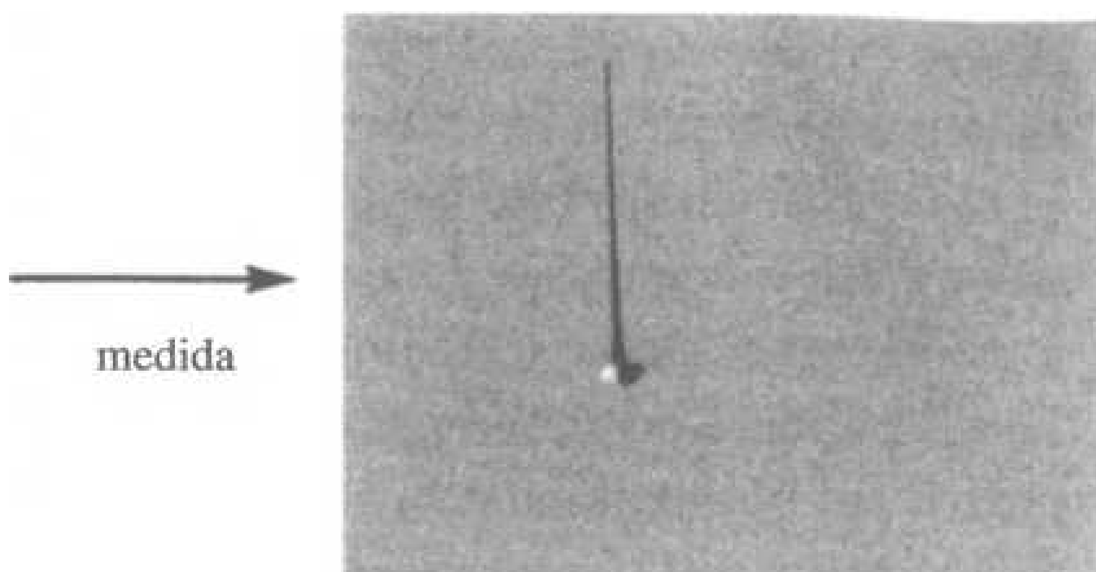


FIGURA 4.7. Cuando una partícula es observada en un lugar, la probabilidad de encontrarla en otro lugar cae a cero, mientras que su probabilidad asciende repentinamente al 100 por cien en el lugar donde es observada.

Se requiere un cálculo matemático para obtener la respuesta exacta (vea las notas de la sección[4.18] si está interesado) pero, cuando se hace, este cálculo predice que los detectores deberían coincidir precisamente el 50 por 100 de las veces (en lugar de predecir acuerdo en más del 50 por 100 de las veces —resultado, como hemos visto, que se encuentra utilizando la hipótesis de EPR de un universo local —). Con impresionante exactitud, esto es precisamente lo que Aspect encontró en sus experimentos, un 50 por 100 de acuerdo. La mecánica cuántica estándar encaja los datos de forma impresionante.

Éste es un éxito espectacular. De todas formas, hay un pero. Después de más de siete décadas, nadie entiende cómo sucede, o siquiera si sucede realmente, el colapso de una onda de probabilidad. Durante años, la hipótesis de que las ondas de probabilidad colapsan ha dado un vínculo poderoso entre las probabilidades que predice la teoría cuántica y los resultados definidos que revelan los experimentos. Pero es una hipótesis llena de enigmas. Para empezar, el colapso no sale de las matemáticas de la teoría cuántica; hay que meterlo a mano, y no hay ninguna forma consensuada ni experimentalmente justificada para hacerlo. En segundo lugar, ¿cómo es posible que por encontrar un electrón en su detector en Nueva York, usted provoque que la onda de probabilidad del electrón en la galaxia Andrómeda caiga a cero instantáneamente?[4.19] Por supuesto, una vez que usted encuentra la partícula en Nueva York es seguro que no será encontrada en Andrómeda pero ¿qué mecanismo desconocido asegura esto con una eficacia tan espectacular? En un lenguaje más vago, ¿cómo «sabe» la onda de probabilidad en Andrómeda,

y en cualquier otro lugar, que tiene que caer a cero simultáneamente?

Abordaremos este problema de la medida en mecánica cuántica en el capítulo 7 (y como veremos, hay otras propuestas que evitan totalmente la idea de ondas de probabilidad que colapsan), pero baste apuntar aquí, como discutimos en el capítulo 3, que algo que es simultáneo desde una perspectiva no es simultáneo desde otra perspectiva en movimiento. (Recuerde a Itchy y Scratchy poniendo en hora sus relojes en un tren en movimiento.) De modo que si una onda de probabilidad llegara a sufrir un colapso simultáneo en el espacio según un observador, no sufriría tal colapso simultáneo según otro observador que esté en movimiento. En la práctica, dependiendo de su movimiento, unos observadores informarán de que el fotón izquierdo fue medido primero, mientras que otros observadores, igualmente dignos de confianza, informarán que el fotón derecho fue medido primero. Así, incluso si la idea de ondas de probabilidad que colapsan fuera correcta, dejaría de ser una verdad objetiva en lo que concierne a qué medida —sobre el fotón izquierdo o sobre el derecho— afecta a la otra. Así, el colapso de ondas de probabilidad parecería discriminar un punto de vista especial —aquél según el cual el colapso es simultáneo en el espacio, aquél según el cual las medidas izquierda y derecha ocurren en el mismo instante—. Pero discriminar una perspectiva especial crea una tensión importante con el núcleo igualitario de la relatividad especial. Se han hecho propuestas para evitar este problema, pero continúa el debate respecto a cuáles, si hay alguna, son acertadas. **[4.20]**

Así pues, aunque la opinión de la mayoría sostiene que hay una coexistencia armoniosa, algunos físicos y filósofos consideran que la relación exacta entre mecánica cuántica, partículas entrelazadas y relatividad especial es una

cuestión abierta. Es ciertamente posible, y en mi opinión probable, que la opinión de la mayoría prevalezca en última instancia en alguna forma más definitiva. Pero la historia muestra que los problemas fundacionales sutiles siembran a veces las semillas de revoluciones futuras. Sobre ésta, sólo el tiempo dirá.

¿Qué vamos a hacer de todo esto?

El razonamiento de Bell y los experimentos de Aspect muestran que el tipo de universo que imaginaba Einstein puede existir en la mente, pero no en la realidad. El de Einstein era un universo en el que lo que usted hace aquí tiene relevancia inmediata sólo para las cosas que están también aquí. La física, en esta visión, era puramente local. Pero ahora vemos que los datos descartan esta forma de pensar; los datos descartan este tipo de universo.

El de Einstein era también un universo en el que los objetos poseen valores definidos de todos los atributos físicos posibles. Los atributos no cuelgan en el limbo, esperando que la medida de un experimentador los llame a la existencia. La mayoría de los físicos diría que Einstein también estaba equivocado en este punto. Las propiedades de las partículas en esta visión mayoritaria nacen cuando las medidas les obligan a ello —una idea que examinaremos más detalladamente en el capítulo 7—. Cuando las partículas no están siendo observadas o interaccionando con el entorno, sus propiedades tienen una existencia borrosa y nebulosa caracterizada únicamente por una probabilidad de que una u otra potencialidad pudiera realizarse. Los más radicales entre quienes sostienen esta opinión llegarían a declarar que, de hecho, cuando nadie y nada está «mirando» o interaccionando con la Luna de ninguna manera, la Luna no está allí.

Sobre esta cuestión, todavía no hay veredicto. Einstein, Podolsky y Rosen afirmaban que la única explicación

razonable al hecho de que las medidas pudieran revelar que partículas ampliamente separadas tenían propiedades idénticas era que las partículas poseyeran estas propiedades definidas durante todo el tiempo (y, en virtud de su pasado común, sus propiedades estuvieran correlacionadas). Décadas más tarde, el análisis de Bell y los datos de Aspect demostraron que esta sugerencia intuitivamente atractiva, basada en la premisa de que las partículas tienen siempre propiedades definidas, falla como explicación de las correlaciones no locales observadas experimentalmente. Pero el fallo en explicar los misterios de la no localidad no significa que la noción de partículas que siempre poseen propiedades definidas esté descartada. Los datos descartan un universo local, pero no descartan que las partículas tengan tales propiedades ocultas.

De hecho, en la década de 1950 Bohm construyó su propia versión de la mecánica cuántica que incorpora a la vez no localidad y variables ocultas. En esta aproximación las partículas tienen siempre una posición definida y una velocidad definida, incluso si nunca podemos medir ambas simultáneamente. La aproximación Bohm hacía predicciones que coincidían totalmente con las de la mecánica cuántica convencional, pero su formulación introducía un elemento de no localidad aún más acentuado en el que las fuerzas que actúan sobre una partícula en un lugar dependen instantáneamente de las condiciones en lugares distantes. En cierto sentido, la versión de Bohm sugería cómo se podría ir hacia el objetivo de Einstein de restaurar algunas de las características intuitivamente razonables de la física clásica —que las partículas tienen propiedades definidas— que habían sido abandonadas por la revolución cuántica, pero también demostraba que eso se hacía al precio de aceptar una no localidad todavía más flagrante. Con este

enorme coste, Einstein habría encontrado poco solaz en este enfoque.

La necesidad de abandonar la localidad es la lección más sorprendente que surge de la obra de Einstein, Podolsky, Rosen, Bohm, Bell y Aspect, así como los muchos otros que desempeñaron papeles importantes en esta línea de investigación. En virtud de su pasado, objetos que en el presente están en regiones enormemente diferentes del universo pueden formar parte de un todo entrelazado mecanocuánticamente. Incluso si están ampliamente separados, tales objetos están comprometidos para comportarse de una manera aleatoria pero coordinada.

Estamos acostumbrados a pensar que una propiedad básica del espacio es que separa y distingue un objeto de otro. Pero ahora vemos que la mecánica cuántica desafía radicalmente esta idea. Dos cosas pueden estar separadas por una enorme cantidad de espacio y pese a todo no tener una existencia completamente independiente. Una conexión cuántica puede unirlas, haciendo que las propiedades de cada una dependan de las propiedades de la otra. El espacio no distingue tales objetos entrelazados. El espacio no puede superar su interconexión. El espacio, incluso una enorme cantidad de espacio, no debilita su interdependencia mecanocuántica.

Algunas personas han interpretado esto como si nos dijera que «todo está conectado con todo lo demás» o que «la mecánica cuántica nos entrelaza a todos en un todo universal». Al fin y al cabo, sigue el razonamiento, en el big bang todo emergió de un lugar puesto que, así lo creemos, todos los lugares que ahora consideramos diferentes eran el mismo lugar en el principio. Y puesto que, como los dos fotones que emergen del mismo átomo de calcio, todo emergió del mismo algo en el principio, todo debería estar entrelazado mecanocuántica-mente con todo lo demás.

Aunque me gusta la sensación, todas estas divagaciones son vagas y exageradas. Las conexiones cuánticas entre los dos fotones que salen del átomo de calcio existen, ciertamente, pero son extraordinariamente delicadas. Cuando Aspect y otros llevan a cabo sus experimentos, es crucial que se permita que los fotones viajen sin ningún impedimento desde su fuente a los detectores. Si fuesen golpeados por partículas perdidas o tropezasen con piezas del aparato antes de alcanzar uno de los detectores, la conexión cuántica entre los fotones se haría enormemente más difícil de identificar. En lugar de buscar correlaciones en las propiedades de dos fotones, ahora sería necesario buscar una pauta completa de correlaciones que impliquen a los fotones y a todo lo demás con lo que pudieran haber chocado. Y a medida que todas estas partículas siguieran su camino, chocando con otras partículas, el entrelazamiento cuántico se extendería de tal modo a través de estas interacciones con el entorno que se haría virtualmente imposible de detectar. Para todos los efectos, el entrelazamiento original entre los fotones habría quedado borrado.

De todas formas, es verdaderamente sorprendente que estas conexiones existan, y que en condiciones de laboratorio cuidadosamente preparadas puedan ser observadas directamente sobre distancias importantes. Ellas nos muestran, fundamentalmente, que el espacio no es lo que en otro tiempo pensábamos que era.

¿Qué pasa con el tiempo?

SEGUNDA PARTE

Tiempo y experiencia

5

5. El río congelado

¿Fluye el tiempo?

El tiempo es uno de los conceptos más familiares pero menos conocidos con que se ha encontrado la humanidad. Decimos que vuela, decimos que es oro, tratamos de ahorrarlo, nos disgustamos cuando lo perdemos. Pero ¿qué *es* el tiempo? Parafraseando a san Agustín, y al juez Potter Stewart,[*9] lo reconocemos cuando lo vemos pero, por supuesto, en el alba del tercer milenio nuestra comprensión del tiempo debería ser más profunda que eso. En algunos aspectos lo es. En otros, no lo es. A lo largo de siglos de interrogación y reflexión, hemos sacado ideas sobre algunos de los misterios del tiempo, pero muchos otros permanecen. ¿De dónde procede el tiempo? ¿Qué significaría tener un universo sin tiempo? ¿Podría haber más de una dimensión temporal, igual que hay más de una dimensión espacial? ¿Podemos «viajar» al pasado? Si lo hiciéramos, ¿podríamos cambiar el desarrollo posterior de los acontecimientos? ¿Hay una cantidad de tiempo mínima y absoluta? ¿Es el tiempo un ingrediente verdaderamente fundamental en la constitución del cosmos, o es simplemente un constructo útil para organizar nuestras percepciones, aunque no forme parte del léxico con el que están escritas las leyes más fundamentales? ¿Podría ser el

tiempo una noción derivada, una noción que emerge de un concepto más básico aún no descubierto?

Encontrar respuestas completas y plenamente convincentes a estas preguntas figura entre los objetivos más ambiciosos de la ciencia moderna. Pero las grandes preguntas no son ni mucho menos las únicas. Incluso la experiencia cotidiana del tiempo incide en algunos de los enigmas más espinosos del universo.

Tiempo y experiencia

Las relatividades especial y general hicieron añicos la universalidad, la unicidad del tiempo. Estas teorías demostraron que podemos tomar un trozo del viejo tiempo universal de Newton y llevarlo con nosotros. Se convierte en nuestro propio reloj personal, nuestra propia vía personal que nos arrastra implacablemente de un instante al siguiente. Nos sorprende la teoría de la relatividad porque aunque nuestro propio reloj personal parece marchar uniformemente, acorde con nuestra sensación intuitiva del tiempo, la comparación con otros relojes revela diferencias. El tiempo para usted no tiene por qué ser el mismo que el tiempo para mí.

Aceptemos esta lección como algo dado. Pero ¿cuál *es* la verdadera naturaleza del tiempo para mí? ¿Cuál es el carácter pleno del tiempo tal como es experimentado y concebido por el individuo, sin un interés primario en hacer comparaciones con las experiencias de otros? ¿Reflejan exactamente estas experiencias la verdadera naturaleza del tiempo? ¿Y qué nos dicen sobre la naturaleza de la realidad?

Nuestras experiencias nos enseñan, sin género de dudas, que el pasado es diferente del futuro. El futuro parece presentar una riqueza de posibilidades, mientras que el

pasado está ligado a una sola cosa, a lo que sucedió realmente. Nos sentimos capaces de influir, de moldear y de afectar al futuro en un grado u otro, mientras que el pasado parece inmutable. Y entre *pasado* y *futuro* está el escurridizo concepto del *ahora,* un punto de soporte temporal que se reinventa a cada momento, como los fotogramas de un filme cuando pasan por la luz intensa del proyector y se convierten en el presente momentáneo. El tiempo parece marchar a un ritmo imparable y perfectamente uniforme, que marca el destino fugaz del *ahora* con cada golpe de la baqueta en el tambor.

Nuestras experiencias nos enseñan también que hay un sesgo evidente en la forma en que se desarrollan las cosas en el tiempo. De nada vale lamentarse por la leche derramada, porque una vez derramada no puede desderramarse y nunca veremos que las salpicaduras de la leche se vuelvan a juntar, suban desde el suelo y se concentren dentro de un vaso en una encimera de la cocina. Nuestro mundo parece atenerse perfectamente a una flecha temporal unidireccional, que nunca se desvía de una regla por la cual las cosas pueden empezar de *esta* manera y terminar de *aquélla,* pero nunca pueden empezar de *aquélla* y terminar de *ésta.*

Nuestras experiencias, por consiguiente, nos enseñan dos cosas primordiales. Primero, *el tiempo parece fluir.* Es como si estuviéramos en la ribera del río del tiempo mientras avanza la poderosa corriente, trayendo el futuro hacia nosotros, convirtiéndose en el *ahora* en el instante en que nos alcanza y siguiendo su rápido curso cuando se aleja corriente abajo hacia el pasado. O, si eso es demasiado pasivo para su gusto, invirtamos la metáfora: nosotros viajamos en el río del tiempo que avanza implacablemente, arrastrándonos desde un ahora al siguiente, mientras el pasado se aleja con el paisaje que pasa y el futuro nos

espera corriente abajo. (Nuestras experiencias también nos han enseñado que el tiempo puede inspirar algunas de las metáforas más sensibleras.) Segundo, *el tiempo parece tener una flecha.* El flujo del tiempo parece ir en una dirección y sólo en una, en el sentido de que las cosas suceden en una y sólo en una secuencia temporal. Si alguien le pasa una caja que contiene una corta película de un vaso de leche que se derrama, pero la película está fragmentada en fotogramas individuales, usted no necesita ninguna ayuda o instrucción del cineasta para recomponer los fotogramas en el orden correcto: le basta con examinar el montón de imágenes. El tiempo parece tener una dirección intrínseca, que apunta desde lo que llamamos pasado hacia lo que llamamos futuro, y las cosas parecen cambiar —la leche se derrama, los huevos se rompen, las velas se consumen, las personas envejecen— en acuerdo universal con esta dirección.

Estos rasgos del tiempo, fáciles de sentir, generan algunos de sus enigmas más intrigantes. ¿Fluye realmente el tiempo? Si lo hace, ¿qué está fluyendo en realidad? ¿Y con qué rapidez fluye esta cosa temporal? ¿Realmente tiene el tiempo una flecha? El espacio, por ejemplo, no parece tener una flecha intrínseca —para un astronauta en lo más recóndito del espacio, izquierda y derecha, delante y detrás, y arriba y abajo, estarían en pie de igualdad— de modo que ¿de dónde vendría una flecha del tiempo? Si existe una flecha del tiempo, ¿es absoluta? ¿O hay cosas que pueden evolucionar en una dirección opuesta a la dirección en que parece apuntar la flecha del tiempo?

Vamos a exponer nuestro conocimiento actual reflexionando en primer lugar sobre estas cuestiones en el contexto de la física clásica. Así que en lo que queda de este capítulo y en el próximo (en los que discutiremos el flujo del tiempo y la flecha del tiempo, respectivamente)

ignoraremos la probabilidad cuántica y la indeterminación cuántica. No obstante, mucho de lo que vamos a aprender se traduce directamente al dominio cuántico, y en el capítulo 7 adoptaremos la perspectiva cuántica.

¿Fluye el tiempo?

Desde la perspectiva de los seres sintientes, la respuesta parece obvia. Mientras escribo estas palabras yo *siento* claramente cómo fluye el tiempo. Con cada golpe de tecla, cada ahora da paso al siguiente. Cuando usted lee estas palabras, sin duda siente también el flujo del tiempo a medida que sus ojos exploran una palabra tras otra a lo largo de la página. Pese a todo, por mucho que los físicos lo hayan intentado, nadie ha encontrado dentro de las leyes de la física ninguna prueba convincente que apoye esta sensación intuitiva de que el tiempo fluye. De hecho, una reformulación de algunas de las ideas de Eins- tein en la relatividad especial proporciona evidencia de que el tiempo no fluye.

Para entender esto, volvamos a la representación del espaciotiem- po como una barra-de-pan que introdujimos en el capítulo 3. Recordemos que las rebanadas que constituyen la barra son los *ahoras* de un observador dado; cada rebanada representa el espacio en un instante de tiempo desde su perspectiva. La unión obtenida colocando una rebanada junto a la siguiente, en el orden en que el observador las experimenta, llena una región de espaciotiempo. Si llevamos esta perspectiva a un extremo lógico e imaginamos que cada rebanada muestra todo el espacio en un instante de tiempo dado según el punto de vista de un observador, y si incluimos todas las rebanadas posibles, desde el pasado antiguo al futuro distante, la barra

englobará todo el universo a lo largo de todo el tiempo: la totalidad del espaciotiempo. Cada ocurrencia, independientemente de cuándo o dónde, está representada por un punto en la barra.

Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 5.1, pero la perspectiva debería plantearle algunas dudas. La perspectiva «exterior» de la figura, en la que estamos examinando el universo entero, es decir, todo el espacio en todo instante de tiempo, es un punto de vista ficticio que ninguno de nosotros tendrá nunca. Todos estamos *dentro* del espacio- tiempo. Todo lo que experimentamos usted o yo alguna vez ha ocurrido en una localización del espacio en un instante de tiempo. Y puesto que la figura 5.1 pretende mostrar todo el espaciotiempo, abarca la totalidad de tales experiencias —las suyas, las mías, y las de todos y todo—. Si usted pudiera acercarse y examinar de cerca todas las idas y venidas en el planeta Tierra, podría ver a Alejandro Magno recibiendo una lección de Aristóteles, a Leonardo da Vinci dando la pincelada final a la Mona Lisa, y a George Washington cruzando el Dela- ware; cuando siguiera examinando la imagen de izquierda a derecha, podría ver a su abuela jugando de pequeña, a su padre celebrando su décimo cumpleaños, y su propio primer día en la escuela; mirando aún más a la derecha de la imagen, podría verse a usted mismo leyendo este libro, el nacimiento de su tataranieta y, un poco más allá, su investidura como presidente. Dada la poca resolución de la figura 5.1, no puede ver realmente estos instantes, pero puede ver la historia (esquemática) del Sol y el planeta Tierra, desde su nacimiento a partir de una nube de gas coalescente hasta la muerte de la Tierra, cuando el Sol se convierta en una gigante roja y la engulla. Todo está allí.

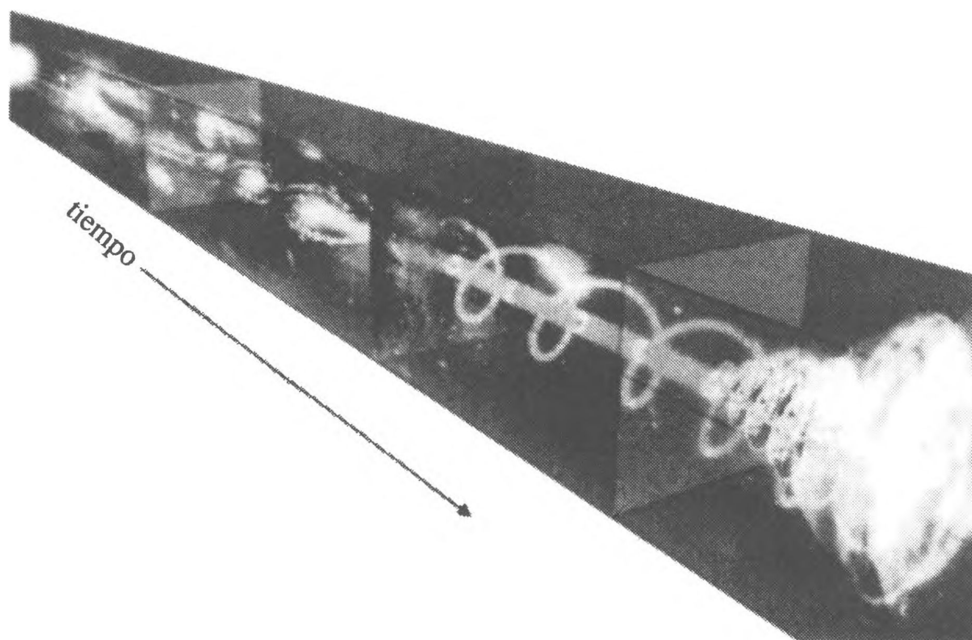


FIGURA 5.1. Una representación esquemática de todo el espacio a lo largo de todo el tiempo (que, por supuesto, sólo representa parte del espacio a lo largo de parte del tiempo) que muestra la formación de algunas galaxias tempranas, la formación del Sol y la Tierra, y la muerte de la Tierra cuando el Sol se hincha como una gigante roja en lo que ahora consideramos nuestro futuro lejano.

Sin duda, la figura 5.1 es una perspectiva imaginaria. Está fuera del espacio y el tiempo. Es la visión desde ningún lugar y ningún tiempo. Incluso así —incluso si no podemos ir realmente más allá de los confines del espaciotiempo y abarcar la plena extensión del universo— la representación esquemática de la figura 5.1 proporciona un medio poderoso de analizar y clarificar las propiedades básicas del espacio y el tiempo. Como primer ejemplo, el sentido intuitivo del flujo del tiempo puede ser retratado vívidamente en este marco por una variante de la metáfora del proyector de cine. Podemos imaginar una luz que ilumina una rebanada de tiempo tras otra, haciendo momentáneamente que la rebanada viva en el presente —

haciéndola el *ahora* momentáneo— sólo para volver a sumirse instantáneamente en la oscuridad cuando la luz pasa a la siguiente rebanada. Precisamente ahora, en esta manera intuitiva de considerar el tiempo, la luz está iluminando la rebanada en la que usted, sentado en el planeta Tierra, está leyendo *esta* palabra, y ahora está iluminando la rebanada en la que usted está leyendo *esta* palabra. Pero, de nuevo, mientras esta imagen parece encajar con la experiencia, los científicos han sido incapaces de encontrar algo en las leyes de la física que encarne esta luz en movimiento. No han encontrado ningún mecanismo físico que distinga a un instante después de otro como momentáneamente real —el *ahora* momentáneo— a medida que el mecanismo avanza siempre hacia el futuro.

Todo lo contrario. Aunque la *perspectiva* de la figura 5.1 es ciertamente imaginaria, hay evidencia convincente de que la barra de espaciotiempo —la totalidad del espaciotiempo, no de rebanada en rebanada— es real. Una consecuencia de la obra de Einstein no muy ampliamente reconocida es que la realidad relativista especial trata todos los instantes por igual. Aunque la noción de *ahora* desempeña un papel central en nuestra visión del mundo, la relatividad subvierte una vez más nuestra intuición y hace del nuestro un universo igualitario en el que cualquier instante es tan real como cualquier otro. Tropezamos con esta idea en el capítulo 3 cuando reflexionábamos sobre el experimento del cubo rotatorio en el contexto de la relatividad especial. Allí, mediante un razonamiento indirecto análogo al de Newton, concluíamos que el espaciotiempo es un algo suficiente para ofrecer la referencia para el movimiento acelerado. Aquí asumimos la cuestión desde otro punto de vista y vamos más lejos. Argumentamos que cada parte de la barra del espaciotiempo en la figura 5.1 existe en pie de igualdad con

todas las demás, lo que sugiere, como creía Einstein, que la realidad engloba pasado, presente y futuro *por igual* y que el flujo que imaginamos que lleva una sección a la luz mientras otra pasa a la oscuridad es ilusorio.

La persistente ilusión de pasado, presente y futuro

Para entender la perspectiva de Einstein necesitamos una definición operativa de la realidad, un algoritmo, si usted quiere, para determinar qué cosas existen en un instante dado. Éste es un enfoque común. Cuando yo contemplo la realidad —lo que existe en este instante— represento en mi mente una especie de instantánea, una imagen mental congelada del universo entero precisamente *ahora.* Mientras escribo estas palabras, mi sensación de lo que existe precisamente *ahora,* mi sensación de la realidad, equivale a una lista de todas esas cosas —el tic de medianoche en el reloj de mi cocina; mi gato estirado en pleno salto del suelo a la ventana; el primer rayo del sol de la mañana iluminando Dublín; el vocerío del parqué en la bolsa de Tokio; la fusión de dos átomos de hidrógeno concretos en el Sol, la emisión de un fotón desde la nebulosa de Orion; el último momento de una estrella moribunda antes de colapsar en un agujero negro— que están, en este instante, en mi imagen mental congelada. Estas son las cosas que suceden precisamente *ahora,* de modo que son las cosas que yo afirmo que existen precisamente *ahora.* ¿Existe precisamente ahora Carlomagno? No. ¿Existe precisamente ahora Nerón? No. ¿Existe precisamente ahora Lincoln? No. ¿Existe precisamente ahora Elvis? No. Ninguno de ellos están en mi lista-ahora actual. ¿Existe ahora alguien nacido en el año 2300 o en el 3500 o en el 57000? No. Una vez más, ninguno de ellos está en mi imagen congelada mental,

ninguno de ellos está en mi rebanada de tiempo actual, y por eso, ninguno de ellos está en mi lista-ahora actual. Por consiguiente, digo sin duda que no existen actualmente. Así es como yo defino la realidad en cualquier instante dado; es un enfoque intuitivo que utilizamos la mayoría de nosotros, a veces de forma implícita, cuando pensamos en la existencia.

Utilizaré esta idea más adelante, pero seamos conscientes de un punto delicado. Una lista de ahora —la realidad en esta manera de pensar— es una cosa curiosa. Nada de lo que usted ve precisamente ahora pertenece a su lista-ahora, porque la luz necesita un tiempo para llegar hasta sus ojos. Cualquier cosa que usted ve precisamente *ahora* ya ha sucedido. Usted no está viendo las palabras de esta página como son *ahora-,* más bien, si está manteniendo el libro a 30 centímetros de su rostro, las está viendo tal como eran hace una milmillonésima de segundo. Si mira al otro lado de una habitación de tamaño medio, está viendo las cosas tal como eran hace entre 10 milmillonésimas y 20 milmillonésimas de segundo; si mira el Gran Cañón está viendo el otro lado tal como era hace una diezmilésima de segundo; si mira la Luna, la está viendo tal como era hace un segundo y medio; si mira el Sol, lo ve como era hace 8 minutos; en el caso de las estrellas visibles a simple vista, las ve como eran entre aproximadamente hace unos años y hace 10.000 años. Curiosamente, entonces, aunque una imagen mental congelada recoge nuestra sensación de realidad, nuestra sensación intuitiva de lo que existe «ahí fuera», dicha imagen consta de sucesos que no podemos experimentar, ni a los que podemos afectar, y ni siquiera registrar precisamente ahora. En su lugar, una lista-ahora actual sólo puede ser recopilada a posteriori. Si conoce a qué distancia está algo, usted puede determinar cuándo emitió la luz que ve ahora y por

eso puede determinar a qué rebanada de tiempo pertenece —en qué lista— ahora ya pasada debería estar registrada. De todas formas, y éste es el punto principal, cuando utilizamos esta información para recopilar la lista-ahora para cualquier instante dado, actualizándola continuamente a medida que recibimos luz de objetos cada vez más lejanos, las cosas que se incluyen en la lista son las cosas que intuitivamente creemos que existían en ese instante.

Es notable que esta forma aparentemente directa de pensar nos lleva a una concepción inesperadamente ampliada de la realidad. Ya ha visto que según el espacio absoluto y el tiempo absoluto de Newton, la imagen congelada que tenemos todos del universo en un instante dado contiene exactamente los mismos sucesos; el ahora de cada uno de nosotros es el mismo ahora, y por ello la lista-ahora de cada uno para un instante dado es idéntica. Si alguien o algo está en su lista- ahora para un instante dado, entonces también está necesariamente en mi lista-ahora para ese instante. La intuición de la mayoría de las personas está aún ligada a esta manera de pensar, pero la relatividad especial nos cuenta una historia muy diferente. Miremos de nuevo la figura 3.4. Dos observadores en movimiento relativo tienen *ahoras* —instantes únicos de tiempo, desde la perspectiva de cada uno— que son diferentes: sus *ahoras* rebanan el espaciotiempo a ángulos diferentes. Y diferentes *ahoras* significan diferentes listas ahora. *Los observadores que se mueven uno con respecto a otro tienen diferentes concepciones de lo que existe en un instante dado, y por ello tienen diferentes concepciones de la realidad.*

A las velocidades cotidianas los ángulos entre las rebanadas-ahora de dos observadores es minúsculo: por eso es por lo que en la vida cotidiana no advertimos ninguna discrepancia entre nuestra definición de ahora y la de cualquier otro. Por esta razón, la mayoría de las discusiones

sobre la relatividad general se centran en lo que sucedería si viajáramos a velocidades enormes —velocidades próximas a la de la luz— puesto que este movimiento amplificaría enormemente los efectos. Pero hay otra forma de amplificar la distinción de las concepciones del *ahora* de dos observadores, y creo que ofrece una aproximación particularmente ilustrativa a la cuestión de la realidad. Se basa en el siguiente hecho simple: si usted y yo rebanamos una barra a ángulos ligeramente diferentes, apenas tendrá un efecto en las rebanadas de pan resultantes. Pero si la barra es *enorme,* la conclusión es diferente. De la misma forma que una abertura minúscula entre las hojas de unas tijeras enormemente largas se traduce en una gran separación entre las puntas de las hojas, cortar una enorme barra de pan a ángulos ligeramente diferentes da rebanadas que se desvían una gran cantidad a distancias alejadas de donde se cruzan las rebanadas. Puede ver esto en la figura 5.2.

Lo mismo es cierto para el espaciotiempo. A las velocidades cotidianas, las rebanadas que representan el *ahora* para dos observadores en movimiento relativo estarán orientadas en ángulos que sólo difieren ligeramente. Si los dos observadores están próximos, esto apenas tendrá efecto. Pero, igual que en la barra de pan, ángulos minúsculos generan grandes separaciones entre las rebanadas cuando su impacto se examina sobre grandes distancias. Y en el caso de las rebanadas de espaciotiempo, una gran desviación entre rebanadas significa un desacuerdo importante sobre qué sucesos considera cada observador que están sucediendo ahora. Esto se ilustra en las Figuras 5.3 y 5.4, e implica que individuos que se mueven uno con respecto a otro, incluso a las velocidades cotidianas ordinarias, tendrán concepciones cada vez más

diferentes del *ahora* si están cada vez más lejos en el espacio.

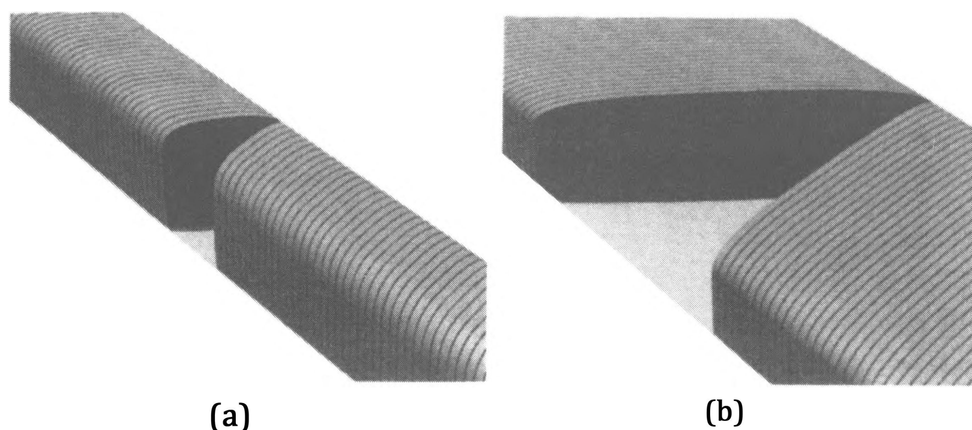


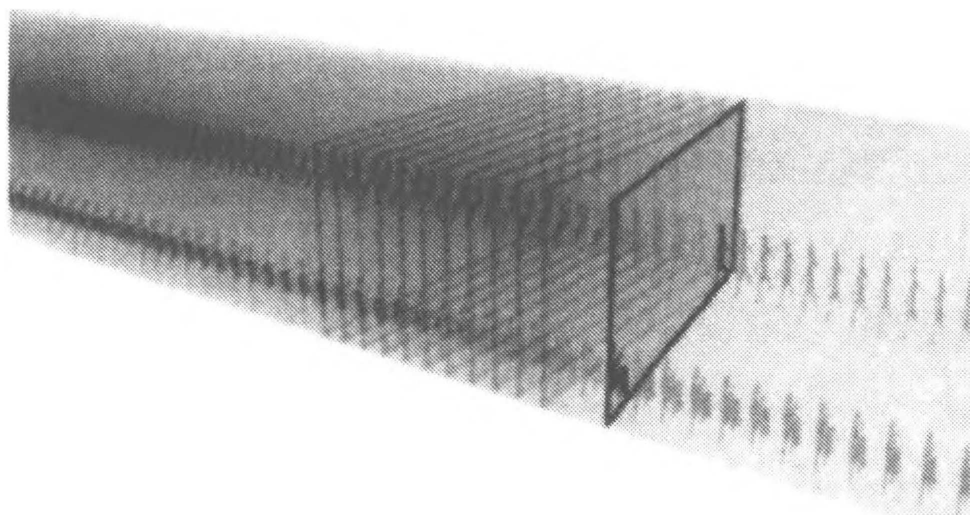
FIGURA 5.2. **(a)** En una barra ordinaria, las rebanadas cortadas a ángulos ligeramente diferentes no se separan de forma significativa, **(b)** Pero cuanto mayor es la barra, para el mismo ángulo, mayor es la separación.

Para concretar, imagine que Chewie está en un planeta en una galaxia muy lejana —a 10.000 millones de años luz de la Tierra— sentado ocioso en su sala de estar. Imagine también que usted (también sentado, leyendo estas palabras) y Chewie se están moviendo uno con respecto a otro (ignoremos, por simplicidad, el movimiento de los planetas, la expansión del universo, los efectos gravitatorios y demás). Puesto que están en reposo relativo, usted y Chewie están en completo acuerdo en cuestiones de espacio y tiempo: ustedes rebanarían el espaciotiempo de manera idéntica, y por ello sus listas-ahora coincidirían exactamente. Al cabo de un rato, Chewie se levanta y va a dar un paseo —con un paso suave y relajado— en una dirección que resulta alejarse directamente de usted. Este cambio en el estado de movimiento de Chewie significa que su concepción del *ahora,* su reba- namiento del

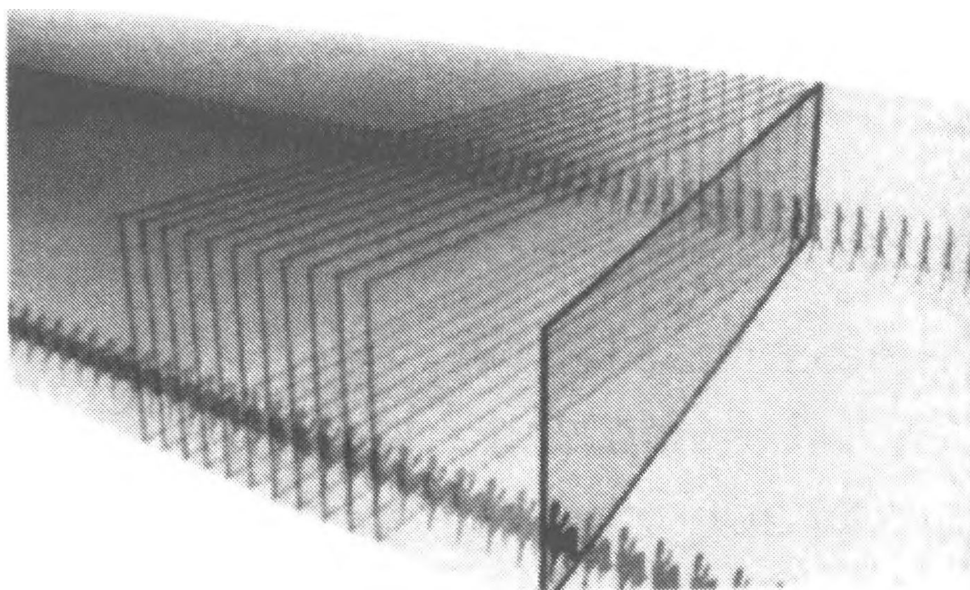
espaciotiempo, rotará ligeramente (ver figura 5.3). Este minúsculo cambio angular no tiene ningún efecto apreciable en la vecindad de Chewie: la diferencia entre su nuevo *ahora* y el de cualquier otro aún sentado en su sala de estar es minúscula. Pero sobre la enorme distancia de 10.000 millones de años luz, este minúsculo cambio en la noción del *ahora* de Chewie se amplifica (como en el paso de la figura 5.3a a 5.3b, pero ahora los protagonistas están separados una enorme distancia, lo que acentúa significativamente el cambio de sus *ahoras). El ahora de él y el de usted, que eran uno y el mismo mientras él seguía sentado, se separan debido a su modesto movimiento.*

Las figuras 5.3 y 5.4 ilustran esquemáticamente la idea clave, pero utilizando las ecuaciones de la relatividad especial podemos calcular cuán diferentes se hacen sus *ahoras.* **[5.1]** Si Chewie se aleja de usted a unos 15 kilómetros por hora (Chewie tiene una buena zancada) los sucesos en la Tierra que pertenecen a su nueva lista-ahora son sucesos que según usted ocurrieron ¡hace aproximadamente 150 años! Según la concepción de Chewie del *ahora* —una concepción que es tan válida como la de usted y que hasta hace un momento coincidía plenamente con ella— usted todavía no ha nacido. Si él se moviese hacia usted a la misma velocidad, el cambio angular sería opuesto, como se ilustra esquemáticamente en la figura 5.4, de modo que el *ahora* de él coincidiría con lo que para usted estaría ¡a 150 años en el futuro! Ahora, según el *ahora* de él, usted quizá ya no sería parte de este mundo. Y si, en lugar de sólo caminar, Chewie se montase en el *Halcón Milenario* y viajara a 1.500 kilómetros por hora (una velocidad menor que la de un Concorde), su *ahora* incluiría sucesos en la Tierra que desde la perspectiva de usted ocurrieron hace 15.000 años o están a 15.000 años en el futuro, dependiendo de si él volara alejándose o

acercándose a usted. Con las elecciones adecuadas de dirección y velocidad de movimiento, Elvis o Nerón o Carlomagno o Lincoln o alguien nacido en la Tierra en lo que usted llama el futuro pertenecerá a la nueva lista-ahora de él.



(a)

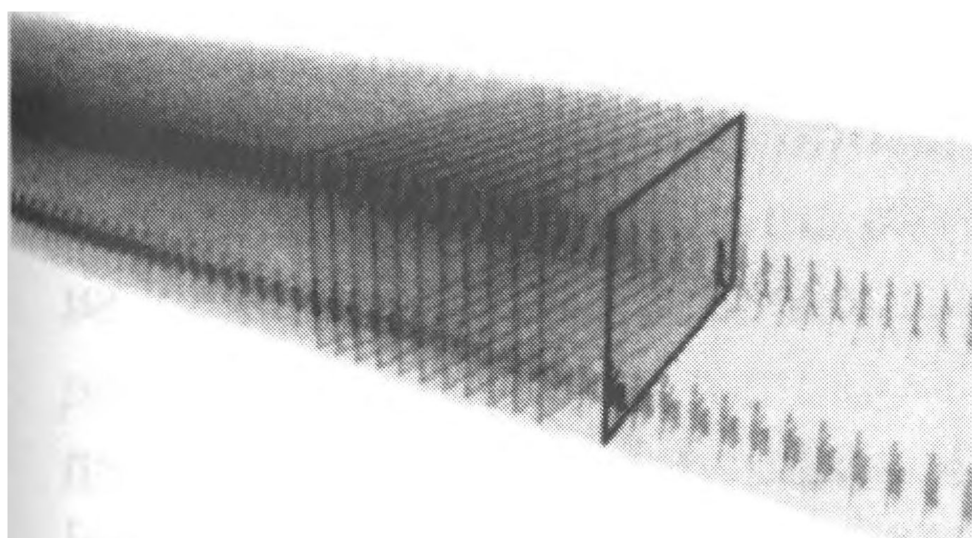


(b)

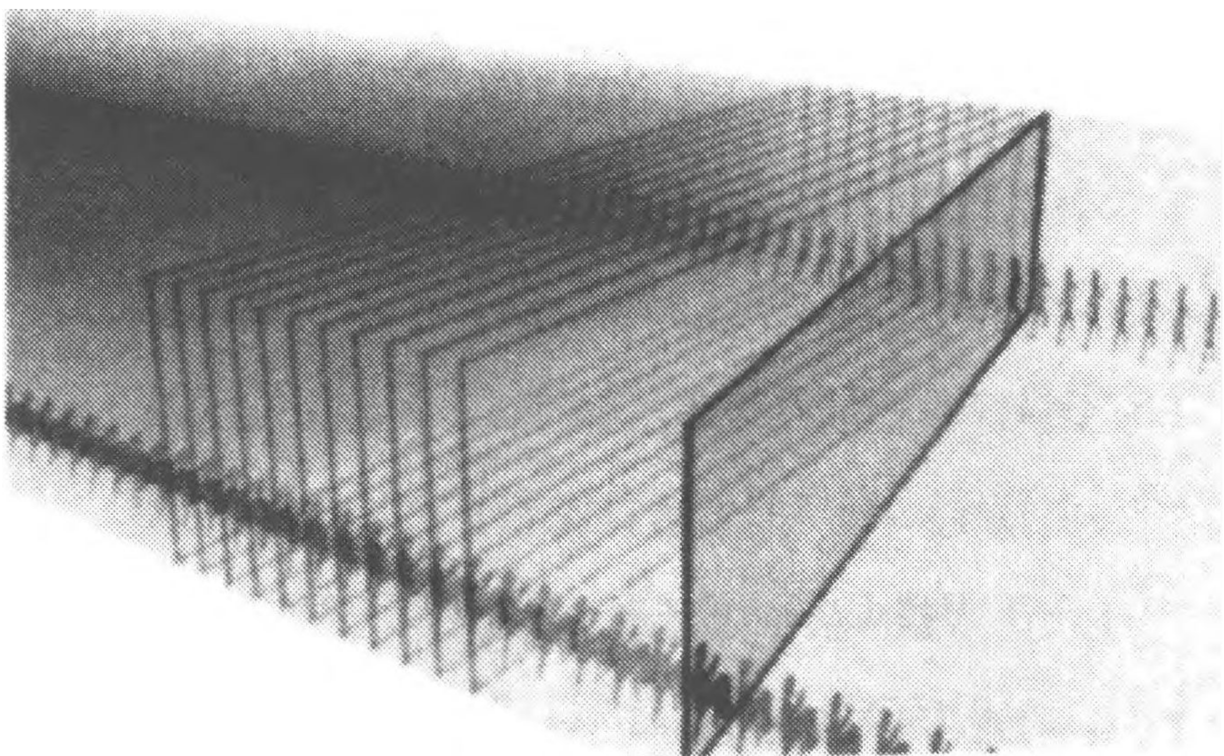
FIGURA 5.3. **(a)** Dos individuos en reposo relativo uno con respecto al otro tienen concepciones idénticas del *ahora* y por lo tanto rebanadas de tiempo idénticas. Si un observador se aleja del otro, las rebanadas de tiempo de cada uno de ellos —lo que cada observador considera *ahora* — rotan con respecto a las del otro; como se ilustra, la rebanada *ahora* oscurecida para el observador en movimiento rota hacia el pasado del observador en reposo, **(b)** Una mayor separación entre los observadores da una mayor desviación entre rebanadas, una mayor desviación en sus concepciones del ahora.

Aunque sorprendente, nada de esto genera ninguna contradicción o paradoja porque, como explicamos antes, cuanto más lejos está algo, más tiempo se tarda en recibir la luz que emite y determinar así que pertenece a una lista-ahora concreta. Por ejemplo, incluso si la aproximación de John Wilkes Booth al palco presidencial en el TeatroFord pertenecerá a la nueva lista-ahora de Chewie si él se levanta y camina alejándose de la Tierra a aproximadamente 15 kilómetros por hora,[5.2] él no puede hacer nada para salvar al presidente Lincoln. A una

distancia tan enorme, se requiere una enorme cantidad de tiempo para recibir e intercambiar mensajes, de modo que sólo los descendientes de Chewie, miles de millones de años después, recibirán realmente la luz procedente de esa noche fatídica en Washington. El punto, no obstante, es que cuando sus descendientes usan esa información para actualizar la inmensa colección de listas-ahora pasadas, encontrarán que el asesinato de Lincoln pertenece a la misma lista-ahora que contiene a Chewie levantándose y empezando a caminar alejándose de la Tierra. Y pese a todo, encontrarán también que un momento antes de que Chewie se levantara, su lista-ahora contenía, entre muchas otras cosas, a usted, en la Tierra en el siglo xxi, todavía sentado, leyendo estas palabras[5.3]



(a)



(b)

FIGURA 5.4. (a) Lo mismo que la figura 5.3a, excepto que cuando un observador se mueve hacia el otro, su rebanada *ahora* rota hacia el futuro, no hacia el pasado, del otro observador, (b) Lo mismo que la figura 5.3b —una mayor separación da una mayor desviación en las concepciones del *ahora,* para la misma velocidad relativa— con rotación hacia el futuro en lugar del pasado.

Del mismo modo, hay cosas sobre nuestro futuro, tales como quién ganará la elección presidencial en Estados Unidos en el año 2100, que parecen completamente abiertas: es más que probable que los candidatos a dicha elección todavía no hayan nacido, y mucho menos que hayan decidido presentarse al cargo. Pero si Chewie se levanta de su silla y camina hacia la Tierra a aproximadamente 10 kilómetros por hora, su rebanada-ahora —su concepción de lo que existe, su concepción de lo que ha sucedido— *incluirá* la elección del primer presidente

del siglo xxn. Algo que parece completamente indecidido para nosotros es algo que ya ha sucedido para él. De nuevo, Chewie no sabrá el resultado de la elección hasta dentro de miles de millones de años, puesto que ése es el tiempo que tardarán en llegarle nuestras señales de televisión. Pero cuando los resultados de la elección lleguen a los descendientes de Chewie y los utilicen para poner al día el libro de imágenes congeladas de historia de Chewie, su colección de listas- ahora pasadas, encontrarán que los resultados de la elección pertenecen a la misma lista-ahora en la que Chewie se levantó y empezó a caminar hacia la Tierra —una lista-ahora, advierten los descendientes de Chewie, que ocurre tan sólo un instante después de uno que lo contiene a usted, en los primeros años del siglo xxi de la Tierra, lo que cierra este párrafo.

Este ejemplo ilustra dos puntos importantes. Primero, aunque estamos acostumbrados a la idea de que los efectos relativistas se hacen evidentes a velocidades próximas a la de la luz, los efectos relativistas pueden ser enormemente amplificados incluso a bajas velocidades cuando se consideran sobre grandes distancias en el espacio. Segundo, el ejemplo aporta una idea sobre la cuestión de si el espaciotiempo (la barra) es realmente una entidad o sólo un concepto abstracto, una unión abstracta del espacio precisamente *ahora* con su historia y su pretendido futuro.

Ya ve usted que la concepción de la realidad de Chewie, su imagen mental congelada, su concepción de lo que existe *ahora,* es tan real para él como nuestra concepción de la realidad es para nosotros. Así pues, al establecer lo que constituye la realidad, pecaríamos de estrechez de miras si no incluyésemos también su perspectiva. Para Newton, tal enfoque igualitario no supondría la más mínima diferencia, porque, en un universo con espacio absoluto y tiempo absoluto, las re- banadas-ahora de todo el mundo

coinciden. Pero en un universo relativista, nuestro universo, supone una gran diferencia. Mientras que

nuestra concepción familiar de lo que existe precisamente ahora equivale a una única rebanada —ahora— nosotros vemos normalmente el pasado como ido y el futuro como todavía por venir —debemos aumentar esta imagen con la rebanada-ahora de Chewie, una rebanada—ahora que, como reveló la discusión, puede diferir sustancialmente de la nuestra. Además, puesto que la posición inicial y la velocidad con la que se mueve Chewie son arbitrarias, deberíamos incluir las reba- nadas-ahora asociadas con todas las posibilidades. Estas rebanadas-ahora, como en nuestra discusión anterior, estarían centradas en la posición inicial de Chewie —o algún otro observador real o hipotético— en el espacio y estaría rotada un ángulo que depende de la velocidad escogida. (La única restricción procede del límite de velocidad establecido por la luz y, como se explica en las notas, en la representación gráfica que estamos utilizando esto se traduce en un límite sobre el ángulo de rotación de 45°, bien en el sentido de las agujas o bien en el sentido contrario.) Como usted puede ver, en la figura 5.5, el conjunto de todas estas rebanadas-ahora llena una región sustancial de la barra espaciotemporal. De hecho, si el espacio es infinito —si las rebanadas-ahora se extienden infinitamente lejos— entonces las rebanadas-ahora rotadas pueden estar centradas arbitrariamente lejos, y por ello su unión barre *todo* punto en la barra espaciotemporal.[*10]

Así pues: *si usted acepta la noción de que la realidad consiste en las cosas que hay en su imagen mental congelada precisamente ahora, y si usted está de acuerdo en que su ahora no es más válido que el ahora de alguien situado muy lejos en el espacio y que puede moverse libremente, entonces la realidad engloba todos los sucesos*

en el espaciotiempo. La barra total existe. De la misma manera que imaginamos que todo el espacio está *realmente* ahí fuera, que existe *realmente,* también deberíamos imaginar que todo el tiempo está *realmente* ahí fuera, que también existe *realmente.* Pasado, presente y futuro parecen ser ciertamente entidades distintas. Pero, como Einstein dijo en cierta ocasión: «Para nosotros físicos convencidos, la distinción entre pasado, presente y futuro es sólo una ilusión, por persistente que sea». **[5.5]** Lo único que es real es la totalidad del espaciotiempo.

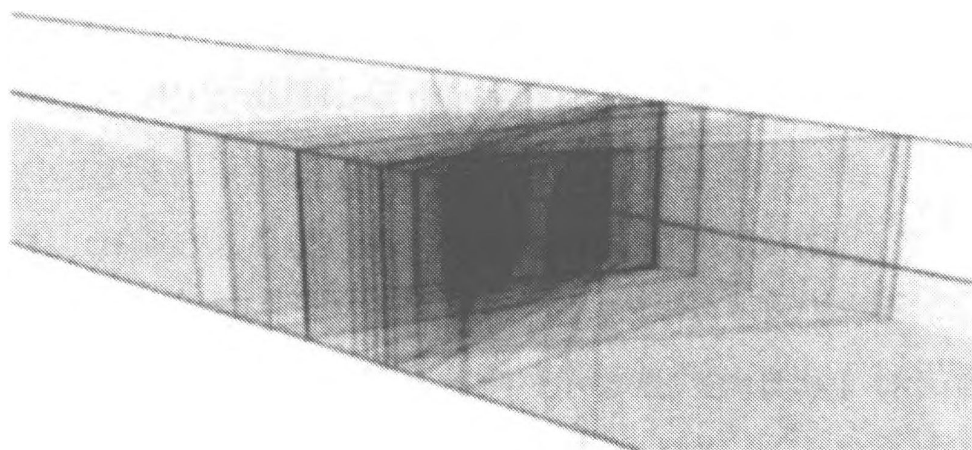


FIGURA 5.5 Una muestra de rebanadas-ahora para una variedad de observadores (reales o hipotéticos) situados a una variedad de distancias de la Tierra, que se mueven con una variedad de velocidades.

La experiencia y el flujo del tiempo

En esta manera de pensar, los sucesos, independientemente de cuándo ocurran desde cualquier perspectiva concreta, simplemente son. Todos existen. Ocupan eternamente su punto concreto en el espacio-

tiempo. No hay flujo. Si usted lo hubiera pasado bien en la Nochevie- ja de 1999, usted lo sigue pasando bien, puesto que ésa es sólo una localización inmutable en el espaciotiempo. Es duro aceptar esta descripción, pues nuestra visión del mundo distingue claramente entre pasado, presente y futuro. Pero si observamos atentamente este familiar esquema temporal y lo confrontamos con los hechos fríos y duros de la física moderna, su único lugar de cobijo parece estar dentro de la mente humana.

Es innegable que nuestra experiencia consciente parece barrer las rebanadas. Es como si nuestra mente proporcionara el proyector mencionado antes, de modo que los instantes de tiempo nacen cuando son iluminados por el poder de la conciencia. La sensación fluyente de un

momento al siguiente surge de nuestro reconocimiento consciente del cambio en nuestros pensamientos, sentimientos y percepciones. Y la secuencia de cambio parece tener un movimiento continuo; parece desplegarse en una historia coherente. Pero —sin ninguna pretensión de precisión psicológica o neurobiológica— podemos imaginar cómo podríamos experimentar un flujo de tiempo incluso si en realidad no hay tal cosa. Para ver lo que quiero decir, imaginemos que estamos viendo *Lo que el viento se llevó* en un DVD defectuoso que salta aleatoriamente hacia delante o hacia atrás: un fotograma aparece momentáneamente en la pantalla y es seguido inmediatamente por otro de una parte completamente diferente de la película. Cuando usted observe esta versión desordenada le será difícil dar sentido a lo que está pasando. Pero Scarlett y Rhett no tienen ningún problema. En cada fotograma hacen lo que siempre han hecho en dicho fotograma. Si usted pudiera detener el DVD en un fotograma concreto y preguntarles sobre sus pensamientos y recuerdos, ellos responderían con las mismas respuestas

que hubieran dado si usted viera el DVD en un reproductor que funcionase correctamente. Si usted les preguntara si no estaban confusos al atravesar la guerra civil sin orden, ellos le mirarían con sorpresa y se imaginarían que usted se había tomado demasiadas copas. En cualquier fotograma dado ellos tendrían los pensamientos y los recuerdos que siempre habían tenido en ese fotograma —y, en particular, esos pensamientos y recuerdos les darían la sensación de que el tiempo está fluyendo de manera suave y coherente hacia delante, como es habitual.

Análogamente, cada momento en el espaciotiempo —cada rebanada de tiempo— es como uno de los fotogramas de una película. Existe ya esté o no iluminado por una luz. Como sucede con Scarlett y Rhett, para el usted que está en cualquier momento semejante, éste es el *ahora,* es el instante que usted experimenta en dicho instante. Y siempre lo será. Además, dentro de cada rebanada individual, sus pensamientos y recuerdos son suficientemente ricos para dar una sensación de que el tiempo ha fluido continuamente hasta ese instante. Este sentimiento, esta sensación de que el tiempo está fluyendo, no requiere instantes previos —fotogramas previos— que sean «iluminados secuencialmente». [5.6]

Y si usted piensa en ello durante un instante más, se dará cuenta de que eso es algo muy bueno, porque la noción de un proyector de luz que crea secuencialmente instantes es altamente problemática por otra razón aún más básica. Si el proyector hiciese adecuadamente su trabajo e iluminase un instante dado —digamos, las campanadas de la No- chevieja de 1999— ¿qué significaría que dicho instante pasa a la oscuridad? Si el instante fuera iluminado, entonces estar iluminado sería una característica del instante, una característica tan duradera e invariable como todo lo demás que sucede en dicho instante. Experimentar

iluminación —estar «vivo», ser el presente, ser *el ahora*— y luego experimentar oscuridad —estar «durmiente», ser el pasado, ser lo que fue— es experimentar cambio. *Pero el concepto de cambio no tiene significado con respecto a un único instante en el tiempo.* El cambio tendría que ocurrir a través del tiempo, el cambio marcaría el paso del tiempo, pero ¿qué noción de tiempo podría ser ésa? Por definición, los instantes *no* incluyen el paso del tiempo —al menos, no el tiempo del que somos conscientes— porque los instantes simplemente son, ellos son la materia prima del tiempo, ellos *no* cambian. Un instante particular no puede cambiar en el tiempo más que un lugar particular puede moverse en el espacio: si el lugar se moviera, sería un lugar diferente en el espacio; si un instante en el tiempo cambiara, sería un instante diferente en el tiempo. La imagen intuitiva de un proyector que hace nacer cada nuevo *ahora* no resiste un examen cuidadoso. En su lugar, cada instante es iluminado, y cada instante permanece iluminado. Cada instante es. Bajo un escrutinio más detallado, el río fluyente del tiempo se parece a un enorme bloque de hielo con cada instante congelado para siempre en su lugar. **[5.7]**

Esta concepción del tiempo es significativamente diferente de la que la mayoría de nosotros hemos interiorizado. Incluso si salió de sus propias ideas, Einstein no estaba preparado para la dificultad de absorber plenamente un cambio tan profundo en perspectiva. Rudolf Carnap**[5.8]** cuenta una maravillosa conversación que mantuvo con Einstein sobre este tema: «Einstein dijo que el problema del ahora le preocupaba seriamente. Explicó que la experiencia del ahora significa algo especial para el hombre, algo esencialmente diferente del pasado y el futuro, pero que esta diferencia importante no se da y no puede darse dentro de la física. Que esta experiencia no pudiera ser captada por la ciencia le parecía una cuestión a

la que había que renunciar lamentable pero inevitablemente».

Esta renuncia deja abierta una cuestión central: ¿es la ciencia incapaz de captar una cualidad fundamental del tiempo que la mente humana capta tan fácilmente como los pulmones toman aire, o es la mente humana la que impone en el tiempo una cualidad de su propia factura, una cualidad que es artificial y que por ello no se manifiesta en las leyes de la física? Si usted me hiciera esta pregunta durante las horas de trabajo, yo me pondría del lado de la última perspectiva, pero por la noche, cuando el pensamiento crítico se diluye en las rutinas ordinarias de la vida, es difícil plantear mucha resistencia al primer punto de vista. El tiempo es un tema sutil y estamos lejos de entenderlo plenamente. Es posible que alguna persona perspicaz conciba algún día una nueva manera de considerar el tiempo y revelar un fundamento físico válido para un tiempo que fluye. Entonces una vez más, la discusión anterior, basada en la lógica y la relatividad, quizá resulte ser toda la historia. Ciertamente, sin embargo, la sensación de que el tiempo fluye está perfectamente enraizada en nuestra experiencia e impregna completamente nuestro pensamiento y nuestro lenguaje. Tanto es así que hemos caído, y seguiremos cayendo, en las descripciones habituales y coloquiales que remiten a un tiempo que fluye. Pero no confundamos lenguaje con realidad. El lenguaje humano es mucho mejor para captar la experiencia humana que para expresar leyes físicas profundas.

— 6 —

6. El azar y la flecha

¿Tiene el tiempo una dirección?

Incluso si el tiempo no fluye, aún tiene sentido preguntar si tiene una flecha: si la forma en que las cosas se desarrollan *en* el tiempo tiene una dirección que pueda discernirse en las leyes de la física. Es la cuestión de si existe un orden intrínseco en el modo en que están salpicados los sucesos a lo largo del espaciotiempo, y si existe una diferencia científica esencial entre un ordenamiento de sucesos y el ordenamiento inverso. Como ya sabemos todos, realmente parece haber una gran distinción de este tipo; es lo que llena la vida de promesas y hace que la experiencia sea importante. Pese a todo, como veremos, explicar la distinción entre pasado y futuro es más difícil de lo que usted hubiera pensado. De forma muy notable, la respuesta que vamos a encontrar está íntimamente ligada a las condiciones precisas en el origen del universo.

El rompecabezas

Mil veces al día nuestras experiencias revelan una distinción entre las cosas que se despliegan en una dirección del tiempo y en la inversa. Una pizza bien caliente se enfría

mientras está en camino desde la pizzería, pero nunca encontramos una pizza que llegue más caliente que cuando fue sacada del homo. La leche removida en el café da un líquido de un marrón uniforme, pero nunca vemos que una taza de café con leche se separe en leche blanca y café negro. Los huevos caen, se rompen y salpican, pero nunca vemos que las salpicaduras de huevo se junten para dar huevos intactos. El dióxido de carbono comprimido en una botella de Coca-Cola sale cuando desenroscamos el tapón, pero nunca encontraremos que el dióxido de carbono que ha escapado se reúna y vuelva a entrar en la botella. Los cubos de hielo puestos en un vaso de agua a temperatura ambiente se funden, pero nunca vemos que partes del agua contenida en un vaso a temperatura ambiente se unan dando cubos de hielo. Estas secuencias de sucesos comunes, así como otras muchas, sólo se dan en un orden temporal. Nunca suceden al revés, y por ello proporcionan una noción de antes y después —nos dan una noción consistente y aparentemente universal de pasado y futuro —. Estas observaciones nos convencen de que si examináramos todo el espaciotiempo desde fuera (como en la figura 5.1), veríamos una asimetría importante a lo largo del eje temporal. Los huevos salpicados estarían a un lado —el lado que convencionalmente llamamos el futuro— de sus contrapartidas intactas.

Quizá el ejemplo más señalado de todos es que nuestras mentes parecen tener acceso a un conjunto de sucesos que llamamos el pasado —nuestros recuerdos— pero ninguno de nosotros parece capaz de recordar el conjunto de sucesos que llamamos el futuro. Así que parece obvio que hay una gran diferencia entre el pasado y el futuro. Parece haber una orientación evidente en cómo evoluciona en el tiempo una enorme diversidad de cosas. Parece haber una distinción evidente entre las cosas que podemos recordar (el pasado)

y las que no podemos (el futuro). Esto es lo que entendemos al decir que el tiempo tiene una orientación, una dirección o una flecha.[6.1]

La física, y con más generalidad la ciencia, se basa en regularidades. Los científicos estudian la Naturaleza, encuentran patrones y codifican estos patrones en leyes naturales. Por lo tanto, usted pensaría que la enorme riqueza de regularidad que nos lleva a percibir una evidente flecha del tiempo sería prueba de una ley fundamental de la Naturaleza. Una manera tonta de formular una ley semejante sería introducir la Ley de la Leche Derramada, que establece que los vasos de leche se derraman pero no se desderraman, o la Ley de los Huevos Salpicados, que establece que los huevos se rompen y salpican pero nunca se desrompen. Pero una ley de ese tipo no nos aporta nada: es meramente descriptiva y no ofrece ninguna explicación aparte de referir una simple observación de lo que sucede. Pese a todo esperamos que en alguna parte en las profundidades de la física debe haber una ley menos tonta que describe el movimiento y las propiedades de las partículas que componen la pizza, la leche, los huevos, el café, las personas y las estrellas —los ingredientes fundamentales de todas las cosas— que muestre por qué las cosas evolucionan a través de una secuencia de pasos pero nunca a la inversa. Una ley semejante daría una explicación fundamental para la flecha del tiempo observada.

Lo desconcertante es que nadie ha descubierto ninguna ley semejante. Y lo que es más, las leyes de la física que han sido formuladas desde Newton, pasando por Maxwell y Einstein, hasta hoy muestran una *completa simetría entre pasado y futuro*. [*11]

En ninguna de estas leyes encontramos una estipulación que afirme que se aplican en una dirección en el tiempo

pero no en la otra. En ninguna parte hay ninguna diferencia entre cómo se ven o se comportan las leyes cuando se aplican en una u otra dirección en el tiempo. Las leyes tratan lo que llamamos pasado y futuro en pie de igualdad. Incluso si la experiencia muestra una y otra vez que existe una flecha en la manera en que evolucionan los sucesos en el tiempo, esta flecha no parece encontrarse en las leyes fundamentales de la física.

Pasado, futuro y las leyes fundamentales de la física

¿Cómo puede ser esto? ¿No proporcionan las leyes de la física ningún apoyo que distinga pasado de futuro? ¿Cómo es posible que ninguna ley de la física explique que los sucesos se desarrollan en *este* orden pero nunca al revés?

La situación es aún más enigmática. Las leyes de la física conocidas afirman realmente —contrariamente a las experiencias de nuestra vida— que el café con leche puede separarse en café negro y leche blanca; una yema salpicada y unos trozos de cáscara pueden reunirse y formar un huevo intacto; el hielo fundido en un vaso de agua a temperatura ambiente puede solidificarse de nuevo en cubos; el gas liberado cuando usted abre su botella de soda puede precipitarse de nuevo dentro de la botella. Todas las leyes físicas que tenemos apoyan plenamente lo que se conoce como *simetría de inversión temporal.* Ésta afirma que si una secuencia de sucesos puede desplegarse en un orden temporal (la leche y el café se mezclan, los huevos se rompen, el gas se escapa) entonces dichos sucesos también pueden desplegarse al revés (la leche y el café se separan, los huevos se recomponen, el gas penetra). Desarrollaré más esto en un momento, pero el resumen en pocas palabras es que no sólo las leyes conocidas no nos dicen por

qué vemos que los sucesos se despliegan sólo en un orden, sino que también nos dicen que, en teoría, los sucesos pueden desplegarse en el orden inverso. [*12]

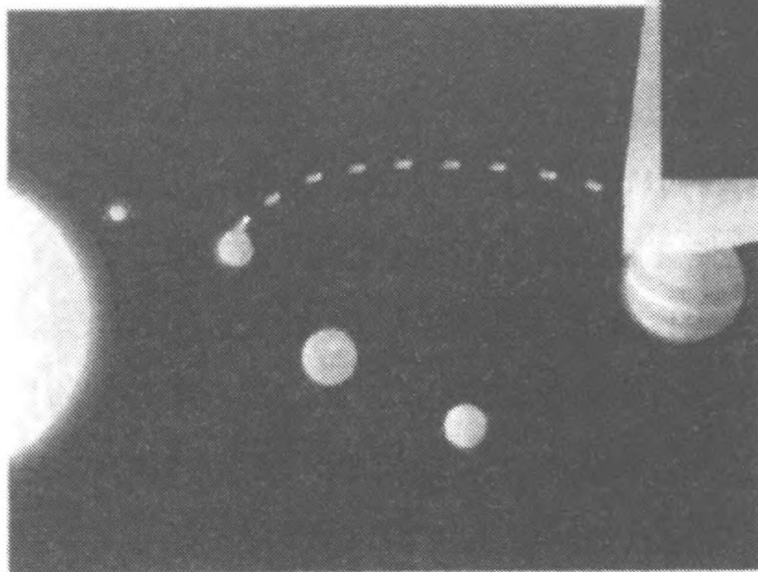
La cuestión candente es *¿por qué no vemos nunca estas cosas?* Creo que se puede apostar con seguridad a que nadie ha sido nunca testigo de que un huevo salpicado se recomponga. Pero si las leyes de la física lo permiten, y si, además, dichas leyes tratan la rotura y la recomposición del huevo por igual, ¿por qué uno no sucede nunca mientras que el otro sí lo hace?

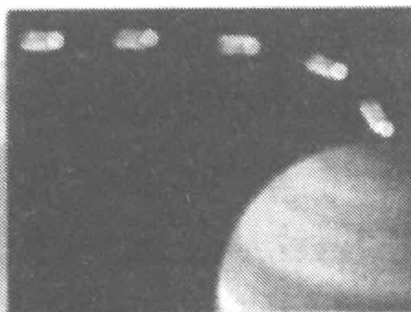
Simetría de inversión temporal

Como primer paso para resolver este rompecabezas necesitamos entender en términos más concretos lo que significa que las leyes de la física conocidas sean simétricas bajo inversión temporal. Para ello, imagine que estamos en el siglo xxv y usted está jugando al tenis en la nueva Liga Interplanetaria con su socio Coolstroke Williams. Poco acostumbrado a la gravedad reducida de Venus, Coolstroke da un revés enorme que lanza la bola a la profunda y aislada oscuridad del espacio. Una lanzadera espacial que pasa filma la bola cuando sale y envía la grabación a la CNN (Celestial News NetWork) para su emisión. Ésta es la pregunta: si los técnicos de la CNN cometieran un error y pasaran la filmación de la pelota de tenis a la inversa, ¿habría alguna forma de averiguarlo? Bien, si usted supiese la orientación de la cámara durante la filmación podría reconocer su error. Pero ¿podría descubrirlo solamente mirando la propia filmación sin ninguna información adicional? La respuesta es no. Si en la dirección temporal correcta (hacia delante) la película mostraba la pelota pasando de izquierda a derecha, entonces en la dirección

inversa mostraría la pelota pasando de derecha a izquierda. Y por supuesto, las leyes de la física clásica permiten que las pelotas de tenis se muevan a la izquierda o a la derecha. De modo que el movimiento que usted ve cuando la película se pasa en la dirección temporal hacia delante o en la dirección temporal inversa es totalmente compatible con las leyes de la física.

Hasta ahora hemos supuesto que no había ninguna fuerza actuando sobre la pelota de tenis, de modo que se movía a velocidad constante. Consideremos ahora la situación más general que incluye fuerzas. Según Newton, el efecto de una fuerza es cambiar la velocidad de un objeto: las fuerzas imparten aceleraciones. Imaginemos entonces que, después de flotar un tiempo a través del espacio, la pelota es capturada por la atracción gravitatoria de Júpiter, lo que hace que se mueva con velocidad creciente describiendo un arco descendente hacia la superficie de Júpiter, como en las Figuras 6.1a y 6.1b. Si usted pasa una película de este movimiento al revés, la pelota de tenis parecerá moverse en un arco que asciende hacia la izquierda desde Júpiter, como en la figura 6.1c. He aquí la nueva pregunta: el movimiento representado por la película cuando se pasa hacia atrás -—el movimiento en orden temporal invertido respecto al que realmente se filmó — ¿está permitido por las leyes clásicas de la física? ¿Es un movimiento que podría ocurrir en el mundo real? Al principio, la respuesta parece que es obviamente sí: las pelotas de tenis pueden moverse tanto en arcos descendentes hacia la derecha como en arcos ascendentes hacia la izquierda, o, para el caso, en otras innumerables trayectorias. Así que ¿cuál es la dificultad? Bien, aunque la respuesta es realmente sí, este razonamiento es demasiado débil y yerra en el propósito real de la pregunta.


(a)


(b)

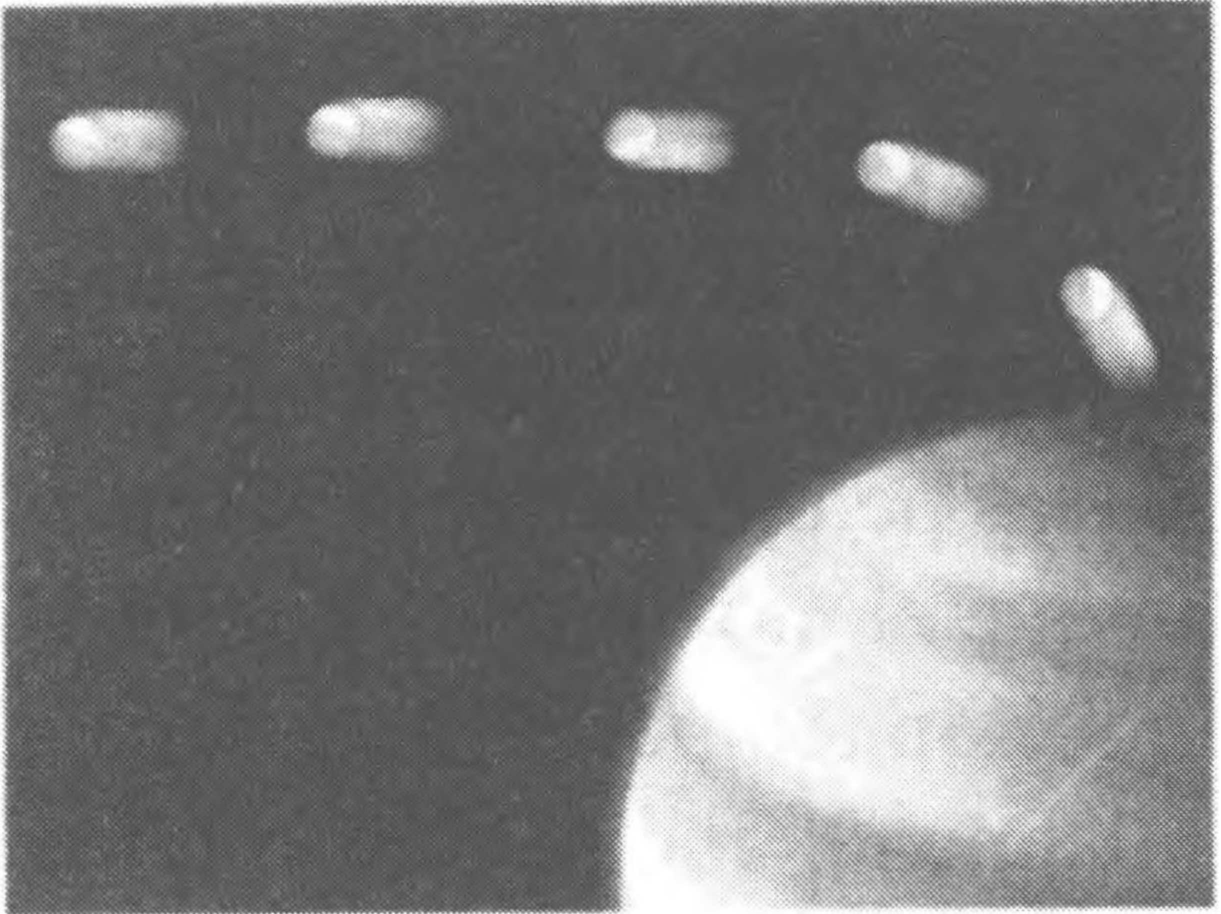


FIGURA 6.1. (a) Una pelota de tenis volando de Venus a Júpiter junto con **(b)** un primer plano, **(c)** El movimiento de la pelota de tenis si su velocidad se invierte inmediatamente antes de que choque contra Júpiter.

Cuando usted pasa la película al revés, ve que la pelota de tenis salta desde la superficie de Júpiter, moviéndose hacia arriba y hacia la izquierda, exactamente con la misma velocidad (pero en la dirección exactamente opuesta) que cuando incidió en el planeta. Esta parte inicial de la película es ciertamente compatible con las leyes de la física: podemos imaginar, por ejemplo, a alguien que lanza la

pelota de tenis desde la superficie de Júpiter precisamente con esta velocidad. La

cuestión esencial es si el *resto* del paso invertido es también compatible con las leyes de la física. ¿Se movería una pelota lanzada con esta velocidad inicial —y sujeta a la gravedad de Júpiter que tira hacia abajo— a lo largo de la trayectoria mostrada en el resto de la película pasada al revés? ¿Desandaría exactamente su trayectoria descendente original, pero al revés?

La respuesta a esta pregunta más refinada es sí. Para evitar cualquier conclusión, expliquémoslo con detalle. En la figura 6.1a, antes de que la gravedad de Júpiter tuviera cualquier efecto significativo, la pelota se dirigía puramente hacia la derecha. Luego, en la figura 6.1b, la poderosa fuerza gravitatoria de Júpiter atrapó la bola y la atrajo hacia el centro del planeta —una atracción que es básicamente hacia abajo pero, como usted puede ver en la figura, es también parcialmente hacia la derecha—. Esto significa que cuando la pelota se acercaba a la superficie de Júpiter, su velocidad hacia la derecha había aumentado algo pero su velocidad hacia abajo había aumentado espectacularmente. Por consiguiente, en la película pasada al revés el lanzamiento de la pelota desde la superficie de Júpiter podría estar dirigido un poco hacia la izquierda pero predominantemente hacia arriba, como en la figura 6.1c. Con esta velocidad de partida, la gravedad de Júpiter habría tenido su máximo impacto sobre la velocidad hacia arriba de la pelota, haciéndola ir cada vez más lenta, al tiempo que también disminuye la velocidad hacia la izquierda de la pelota aunque menos espectacularmente. Y con la velocidad ascendente de la pelota en rápida disminución, su movimiento pasaría a estar dominado por su velocidad en dirección hacia la izquierda, haciéndola seguir una trayectoria en arco ascendente hacia la izquierda. Casi al

final de este arco la gravedad habría debilitado todo el movimiento hacia arriba tanto como la velocidad adicional hacia la derecha que la gravedad de Júpiter impartió a la pelota en su caída, dejando a la bola moviéndose puramente hacia la izquierda con exactamente la misma velocidad que tenía en su aproximación inicial.

Todo esto puede hacerse cuantitativo, pero el punto que cabe señalar es que esta trayectoria es exactamente la inversa del movimiento original de la pelota. Con sólo invertir la velocidad de la pelota, como en la figura 6.1c —lanzándola con la misma velocidad pero en dirección contraria— se puede rehacer completamente su trayectoria original, pero al revés. Trayendo de nuevo la película a la discusión, vemos que la trayectoria en arco ascendente hacia la izquierda —la trayectoria que acabamos de calcular con un razonamiento basado en las leyes de movimiento de Newton— es exactamente la que veríamos al pasar la película al revés. De modo que el movimiento de la bola con el tiempo invertido, como se muestra en la película pasada al revés, se adecúa a las leyes de la física con la misma seguridad que el movimiento hacia delante en el tiempo. El movimiento que habríamos visto al pasar la película al revés es movimiento que podría suceder realmente en el mundo real.

Aunque hay algunas sutilezas que he relegado a las notas finales, esta conclusión es general.[6.2] Todas las leyes conocidas y aceptadas concernientes al movimiento —desde la mecánica de Newton recién discutida a la teoría electromagnética de Maxwell, las teorías de la relatividad especial y general de Einstein (recuerde, estamos dejando fuera la mecánica cuántica hasta el próximo capítulo)— incorporan la simetría bajo inversión temporal: el movimiento que puede ocurrir en la dirección habitual hacia delante en el tiempo puede ocurrir igualmente a la inversa.

Puesto que la terminología puede ser algo confusa, déjeme volver a hacer énfasis en que no estamos invirtiendo el tiempo. El tiempo está haciendo lo que hace siempre. En su lugar, nuestra conclusión es que *podemos hacer que un objeto describa su trayectoria al revés por el simple procedimiento de invertir su velocidad en cualquier punto de su camino.* De forma equivalente, el mismo procedimiento —invertir la velocidad del objeto en un punto de su camino— haría que el objeto ejecute el movimiento que hubiéramos visto en una película pasada al revés.

Pelotas de tenis y huevos aplastados

Observar una pelota de tenis lanzada entre Venus y Júpiter —en una u otra dirección—no es particularmente interesante. Pero puesto que la conclusión que hemos alcanzado es aplicable en general, vayamos ahora a algún lugar más excitante: su cocina. Coloque un huevo en la encimera de su cocina, hágalo rodar hacia el borde y déjelo caer al suelo y aplastarse. Por supuesto, hay mucho movimiento en esta secuencia de sucesos. El huevo cae. El huevo se rompe. La clara se dispersa por aquí y por allá. Las baldosas vibran. Se forman remolinos en el aire circundante. La fricción genera calor, haciendo que los átomos y moléculas del huevo, el suelo y el aire vibren un poco más rápido. Pero de la misma forma que las leyes de la física nos muestran cómo podemos hacer que la pelota de tenis describa su camino exacto al revés, las mismas leyes muestran cómo podemos hacer que cada trozo de la cáscara de huevo, cada gota de yema, cada sección del suelo y cada bolsa de aire describa exactamente su movimiento al revés. «Todo» lo que tenemos que hacer es invertir la velocidad de todos y cada uno de los

constituyentes del revoltijo. Más exactamente, el razonamiento utilizado con la pelota de tenis implica que si, hipotéticamente, fuéramos capaces de invertir simultáneamente la velocidad de cada átomo y cada molécula involucrados directa o indirectamente en el huevo espachurrado, todo el movimiento de la salpicadura procedería al revés.

Una vez más, igual que con la pelota de tenis, si tuviéramos éxito al invertir todas estas velocidades habríamos visto lo que parecería una película pasada al revés. Pero, a diferencia de la pelota de tenis, la inversión del movimiento del huevo salpicado sería extraordinariamente impresionante. Una onda de moléculas de aire agitadas y minúsculas vibraciones del suelo convergería en el lugar de la colisión desde todas las partes de la cocina, haciendo que cada trozo de cáscara y gota de yema se dirigiese de nuevo hacia el lugar del impacto. Cada ingrediente se movería exactamente con la misma velocidad que tenía en el proceso de salpicadura original, pero cada uno se movería ahora en dirección contraria. Las gotas de yema volarían de nuevo hasta formar un glóbulo al tiempo que se juntaban los pequeños fragmentos de cáscara, perfectamente alineados para unirse formando un contenedor ovoide liso. Las vibraciones del aire y el suelo conspirarían de forma precisa con el movimiento de la miríada de gotas de yema y trozos de cáscara para dar al huevo recién reconstruido el golpe exacto para saltar desde el suelo, subir hasta la encimera de la cocina y aterrizar suavemente en el borde con el movimiento rotacional exacto para rodar unos pocos centímetros y detenerse suavemente. Esto es lo que sucedería si pudiéramos realizar la tarea de la inversión total y exacta de velocidad de todo lo involucrado.[6.3]

Así pues, ya sea un suceso simple, como una pelota de tenis volando, o algo más complejo, como la salpicadura de un huevo, las leyes de la física muestran que lo que sucede en una dirección temporal también puede suceder, al menos en principio, al revés.

Teoría y práctica

Las historias de la pelota de tenis y el huevo hacen más que ilustrar la simetría bajo inversión temporal de las leyes de la Naturaleza. También sugieren por qué, en el mundo real de la experiencia, vemos muchas cosas que suceden de una manera pero nunca a la inversa. Hacer que la pelota de tenis desandará su camino no era tan difícil. La cogíamos y la lanzábamos con la misma velocidad en la dirección opuesta. Eso es. Pero hacer que todos los detritus caóticos del huevo desanden su camino sería enormemente más difícil. Tendríamos que coger cada fragmento de la salpicadura, y lanzar cada uno de ellos simultáneamente a la misma velocidad pero en dirección contraria. Evidentemente, eso está más allá de lo que nosotros (o incluso todos los caballos del rey y todos los hombres del rey) podemos hacer realmente.

¿Hemos encontrado la respuesta que hemos estado buscando? La razón de que los huevos se aplasten pero no se desaplasten, incluso si ambas acciones están permitidas por las leyes de la física, ¿es una simple cuestión de lo que se puede y lo que no se puede en la práctica? ¿Se trata simplemente de que es fácil hacer que un huevo se aplaste —basta dejarlo rodar por la encimera— pero extraordinariamente difícil hacer que se desaplaste?

Bien, créame que si ésta fuera la respuesta, yo no me hubiese ocupado tanto de ella. La cuestión de facilidad

frente a dificultad es una parte esencial de la respuesta, pero la historia completa en la que esto encaja es mucho más sutil y sorprendente. Llegaremos allí a su debido tiempo, pero primero tenemos que precisar un poco más la discusión de esta sección. Y eso nos lleva al concepto de entropía.

Entropía

Grabada en una lápida en el Zentralfriedhof en Viena, cerca de las tumbas de Beethoven, Brahms, Schubert y Strauss, hay una simple ecuación, $S = k \log W$, que expresa la formulación matemática de un poderoso concepto conocido como *entropía.* La lápida lleva el nombre de Ludwig Boltzmann, uno de los físicos más ingeniosos de finales del siglo xix. En 1906, con mala salud y sufriendo de depresión, Boltzmann se suicidó mientras estaba de vacaciones en Trieste con su mujer y su hija. Irónicamente, pocos meses más tarde los experimentos empezaron a confirmar que las ideas que había defendido Boltzmann apasionadamente durante toda su vida eran correctas.

La noción de entropía fue desarrollada inicialmente durante la revolución industrial por científicos interesados en la operación de calderas y máquinas de vapor, quienes ayudaron a desarrollar el campo de la termodinámica. A lo largo de muchos años de investigación, las ideas subyacentes fueron refinadas, culminando en la aproximación de Boltzmann. Su versión de la entropía, expresada concisamente por la ecuación que hay en su lápida, utiliza el razonamiento estadístico para ofrecer un vínculo entre el enorme número de ingredientes individuales que constituyen el sistema físico y las propiedades globales del sistema.[6.4]

Para hacerse una idea, imagine que desencuaderna una copia de *Guerra y paz,* arrojando al aire sus 693 hojas a doble cara, y luego hace un montón con las hojas desparramadas.>**[6.5]** Cuando examine la pila resultante, será muchísimo más probable que las páginas estén desordenadas y no que estén ordenadas. La razón es obvia. Hay muchas maneras en que puede barajarse el orden de las páginas, pero sólo una forma de que el orden sea el correcto. Para estar en orden, por supuesto, las páginas deben estar dispuestas exactamente como 1, 2; 3, 4; 5, 6; y así sucesivamente hasta 1.385, 1.386. Cualquier otra disposición está desordenada. Una observación simple pero esencial es que, si todo lo demás sigue igual, cuantas más sean las formas en que algo puede suceder, más probable es que suceda. Y si algo puede suceder de *muchísimas* más maneras, como que las páginas aterricen en el orden numérico erróneo, es *muchísimo* más probable que suceda. Todos sabemos esto intuitivamente. Si usted compra un billete de lotería, hay sólo una forma de que pueda ganar. Si usted compra un millón de billetes, cada uno con números diferentes, hay un millón de formas de que pueda ganar, de modo que sus probabilidades de hacerse rico son un millón de veces más altas.

La entropía es un concepto que precisa esta idea contando el número de formas, compatibles con las leyes de la física, en que puede realizarse cualquier situación física dada. Alta entropía significa que hay muchas maneras; baja entropía significa que hay pocas maneras. Si las páginas de *Guerra y paz* están apiladas en el orden numérico adecuado, ésa es una configuración de baja entropía, porque hay uno y sólo un ordenamiento que satisface el criterio. Si las páginas no están en orden numérico, ésa es una situación de alta entropía, porque un poco de cálculo muestra que hay 124552198453778343366002935370498

8291633611012463890451368876912646868955918529845043773940692947439507941893387518765276567140592866271516707473912957138253800016108126465301823420562057147320617202938290291250213170227821191347358265588154107136014311932215753415973385542846729869139815159925119085867260993481056143034134383056377136715110570478694133391293419244096105142887984779085360950895401401259328506329060341095131494663898390526767610427804166730154945522818861025024633866260360150888664701014297085458481514159839254687623129529334782951868123707745965224321488873516792844834030007871706366846238435362424516736228610919853939181503076046890466491297894062503326518685837322713637024739040189109406498813983802654511148781649140342644411087191184416428090275713773868648950906725870843021579501589916232045813012950834386537908191823777385214375363122531641598589268105976528144801387748697026525462643937189392730592179674716916697815519856976926924946738364227822733457767180733162404336369527711836741042844934722347792234027225630721193853912472880929072034271692377936207650190457109788774453544358680331916095924987744319498699770033324946307324375535322906744817657953956218403295168144271042227608124289048716428664872403070364864934832509996672897344642531034930062662201460431205110109328239624925119689782833061921508282708143936599873268490479941668396577478902124562796195600187060805768778947870098610692265944872693410000872699876339900302559168582063973485103562967646116002251592001137227412733180748295472481928076532664070230

832754286312646671501355905966429773337131834
654748547607012423301287213532123732873272187
482526403991104970017214756470049929226458643
522650111999999999999999999999999999999999999
999999999999999999999999999999999999999999999
999999999999999999999999999999999999999999999
999999999999999999999999999999999999999999999 —aproximadamente 10^{1878}— disposiciones diferentes de páginas desordenadas.[6.6] Si usted arroja al aire las páginas y luego las reúne en un montón, es casi seguro que caerán fuera del orden numérico, porque tales configuraciones tienen una entropía muchísimo más alta —hay muchas más formas de llegar a un resultado desordenado— que la única disposición en la que están en el orden numérico correcto.

En principio, podríamos utilizar las leyes de la física clásica para averiguar dónde aterrizará exactamente cada página después de que la pila total haya sido lanzada al aire. De modo que, una vez más en principio, podríamos predecir exactamente la disposición resultante de las páginas y con ello (a diferencia de lo que sucede en mecánica cuántica, que ignoraremos hasta el próximo capítulo)[6.7] parecería que no hay necesidad de basarse en nociones probabilistas tales como qué resultado es más o menos probable que otro. Pero el razonamiento estadístico es a la vez potente y útil. Si *Guerra y paz* fuera un panfleto de sólo un par de páginas podríamos ser capaces de completar satisfactoriamente los cálculos necesarios, pero sería imposible hacer esto con el *Guerra y Paz* real.[6.8] Seguir el movimiento preciso de 693 hojas blandas de papel mientras son arrastradas por suaves corrientes de aire y se frotan, deslizan y golpean una contra otra sería una tarea monumental, mucho más allá de la capacidad incluso del supercomputador más potente.

Además —y esto es crítico— tener la respuesta exacta ni siquiera sería útil. Cuando usted examina el montón de páginas resultante, está mucho menos interesado en los detalles exactos de dónde resulta estar cada página que en la cuestión general de si las páginas están en el orden correcto. Si lo están, perfecto. Usted podría sentarse y seguir leyendo sobre Ana Pavlovna y Nicolai Ilych Rostov, como es habitual. Pero si usted encontrara que las páginas no estaban en su orden correcto, los detalles precisos de la disposición de las páginas son algo que probablemente no le preocuparía mucho. Si usted ha visto una disposición de páginas desordenada, ha visto prácticamente todas. A menos que por alguna extraña razón reparara en las minucias de qué páginas resultan estar en una u otra posición en el montón, usted apenas notaría si alguien barajase todavía más una disposición de páginas desordenada que usted le hubiese dado inicialmente. El montón inicial parecería desordenado y la pila barajada todavía más también parecería desordenada. De modo que el razonamiento estadístico no sólo es enormemente más fácil de realizar, sino que la respuesta que da —ordenado frente a desordenado— es más relevante para nuestro interés real, para el tipo de cosas de las que normalmente tomaríamos nota.

Este tipo de pensamiento a grandes rasgos es fundamental para la base estadística del razonamiento entrópico. De la misma forma que cualquier billete de lotería tiene la misma probabilidad de salir ganador que cualquier otro, al cabo de muchos lanzamientos de *Guerra y paz* cualquier ordenación particular de las páginas tiene tanta probabilidad de ocurrir como cualquier otra. Lo que hace que funcione razonablemente el razonamiento estadístico es nuestra declaración de que hay dos clases interesantes de configuraciones de páginas: ordenada y desordenada. La

primera clase tiene un miembro (el ordenamiento de páginas correcto 1, 2; 3, 4; y así sucesivamente) mientras que la segunda clase tiene un número enorme de miembros (cualquier otro ordenamiento posible). Es razonable utilizar estos dos tipos de clases puesto que, como antes, recogen la valoración general que usted hubiera hecho al ir pasando las hojas en cualquier disposición.

Incluso así, quizá usted sugiera que podrían hacerse distinciones más finas entre estas dos clases, tales como disposiciones con sólo un puñado de páginas desordenadas, disposiciones con sólo las páginas del primer capítulo desordenadas, y cosas así. De hecho, a veces puede ser útil considerar estas clases intermedias. Sin embargo, el número de disposiciones de páginas posibles en cada una de estas nuevas subclases sigue siendo extraordinariamente pequeño comparado con el número en la clase totalmente desordenada. Por ejemplo, el número total de disposiciones desordenadas que implican sólo las páginas en la Parte Uno de *Guerra y paz* es 1O“^{178} del 1 por 100 del número total de disposiciones desordenadas que incluyen todas las páginas. Así, aunque en los lanzamientos iniciales del libro desencuadernado la disposición de páginas resultante pertenecería probablemente a una de las intermedias, y no totalmente desordenadas, es casi seguro que si usted repite la acción de lanzarlas muchas veces, el orden de páginas no mostrará finalmente ninguna pauta obvia. La disposición de páginas evoluciona hacia la clase completamente desordenada, puesto que hay muchas disposiciones de páginas que cuadran esta cuenta.

El ejemplo de *Guerra y paz* destaca dos características esenciales de la entropía. En primer lugar, *la entropía es una medida de la cantidad de desorden en un sistema físico.* Alta entropía significa que muchas reordenaciones de los ingredientes que constituyen el sistema pasarían

inadvertidas, y esto significa a su vez que el sistema está altamente desordenado (cuando todas las páginas de *Guerra y paz* están desordenadas, cualquier barajado posterior apenas será advertido puesto que simplemente deja las páginas en un estado desordenado). Baja entropía significa que muy pocos reordenamientos pasarían inadvertidos, y esto significa a su vez que el sistema está altamente ordenado (cuando las páginas de *Guerra y paz* empiezan en su orden adecuado, usted puede detectar fácilmente casi cualquier reordenamiento). En segundo lugar, en sistemas físicos con muchos constituyentes (por ejemplo, libros con muchas páginas arrojadas al aire) hay una evolución natural hacia un mayor desorden, puesto que el desorden puede conseguirse de muchas más maneras que el orden. En el lenguaje de la entropía, éste es el enunciado de que *los sistemas físicos tienden a evolucionar hacia un estado de entropía más alta.*

Por supuesto, para hacer el concepto de entropía preciso y universal la definición física no implica contar el número de disposiciones de páginas de un libro u otro que le dejen con la misma apariencia, ya sea ordenada o desordenada. En su lugar, la definición física cuenta el número de reordenamientos de los constituyentes fundamentales —átomos, partículas subatómicas y demás— que dejan inalteradas las propiedades globales, «de trazo grueso», de un sistema físico. Como en el ejemplo de *Guerra y paz,* baja entropía significa que muy pocos reordenamientos pasarían inadvertidos, de modo que el sistema está altamente ordenado, mientras que alta entropía significa que muchos reordenamientos pasarían inadvertidos, y eso significa que el sistema está muy desordenado. [*13]

Para un buen ejemplo físico, uno que pronto nos resultará útil, pensemos en la botella de Coca-Cola antes mencionada. Cuando un gas, como el dióxido de carbono

que estaba inicialmente confinado en la botella, se dispersa uniformemente por una habitación, hay *muchos* reordenamientos de las moléculas individuales que no tendrán ningún efecto apreciable. Por ejemplo, si usted agita los brazos, las moléculas de dióxido de carbono se moverán de un lado a otro, cambiando rápidamente sus posiciones y velocidades. Pero en conjunto no habrá ningún efecto cualitativo sobre su disposición. Las moléculas estaban uniformemente dispersas antes de que usted agitara los brazos, y estarán uniformemente dispersas después de que usted lo haya hecho. La configuración del gas uniformemente disperso es insensible a un número enorme de reordenamientos de sus constituyentes moleculares, y por lo tanto está en un estado de alta entropía. Por el contrario, si el gas estuviese disperso en un espacio más pequeño, como cuando estaba en la botella, o confinado por una barrera en un rincón de la habitación, tiene una entropía significativamente menor. La razón es simple. Igual que los libros más delgados tienen menos reordenamientos de páginas, los espacios más pequeños ofrecen menos lugares donde pueden estar localizadas las moléculas, y por lo tanto permiten menos reordenamientos.

Pero cuando usted desenrosca el tapón de la botella o elimina la barrera, abre todo un nuevo universo a las moléculas de gas, y mediante sus choques y vibraciones éstas se dispersan rápidamente para explorarlo. ¿Por qué? Es el mismo razonamiento estadístico que en el caso de las páginas de *Guerra y paz.* Sin duda, algunas de las vibraciones moverán unas pocas moléculas de gas dentro de la nube inicial de gas o harán que unas pocas que han dejado la masa vuelvan a la nube densa de gas inicial. Pero puesto que el volumen de la habitación supera al de la nube de gas inicial, hay muchos más reordenamientos disponibles para las moléculas si se dispersan fuera de la nube que los

que hay si permanecen dentro de ella. En promedio, las moléculas de gas se difundirán desde la nube inicial y se aproximarán lentamente a un estado de dispersión uniforme por toda la habitación. Así pues, la configuración inicial de entropía más baja, con todo el gas agrupado en una región pequeña, evoluciona naturalmente hacia la configuración de entropía más alta, con el gas uniformemente disperso en el espacio más grande. Y una vez que ha alcanzado tal uniformidad, el gas tenderá a mantener este estado de alta entropía: los golpes y los empujones siguen haciendo que las moléculas se muevan de aquí para allá, dando lugar a un reordenamiento tras otro, pero la aplastante mayoría de estos reordenamientos no afectan a la apariencia global del gas. Eso es lo que significa tener alta entropía.**[6.9]**

En principio, como sucedía con las páginas de *Guerra y paz,* podríamos utilizar las leyes de la física clásica para determinar exactamente dónde estará cada molécula de dióxido de carbono en un instante dado. Pero debido al enorme número de moléculas de CO_2 —aproximadamente 10^{24} en una botella de Coca-Cola— llevar a cabo tales cálculos es prácticamente imposible. E incluso si fuéramos capaces de hacerlo de alguna manera, tener una lista de un cuatrillón de posiciones y velocidades de partículas difícilmente nos daría una idea de cómo estaban distribuidas las moléculas. Centramos en características estadísticas de trazo grueso —¿está el gas disperso o agrupado, es decir, tiene alta o baja entropía?— es mucho más ilustrativo.

Entropía, la segunda ley y la flecha del tiempo

La tendencia de los sistemas físicos a evolucionar hacia estados de entropía más alta se conoce como la *segunda ley de la termodinámica.* (La primera ley es la familiar conservación de la energía.) Como antes, la base de la ley es simple razonamiento estadístico: hay muchas más

maneras de que un sistema tenga entropía más alta, y «más maneras» significa que es más probable que un sistema evolucione hacia una de estas configuraciones de alta entropía. Nótese, sin embargo, que ésta no es una ley en el sentido convencional puesto que, aunque tales sucesos son raros y poco probables, algo *puede* pasar de un estado de alta entropía a otro de entropía menor. Cuando usted arroja un montón de páginas al aire y luego las reúne en una pila, puede suceder que queden en un orden numérico perfecto. Usted no apostaría mucho a que esto suceda, pero es posible. También es posible que los choques y los empujones hagan que todas las moléculas de óxido de carbono dispersas se muevan al unísono y vuelvan al interior de su botella abierta de Coca-Cola. No contenga la respiración esperando este resultado, pero *puede* suceder. **[6.10]**

El gran número de páginas en *Guerra y paz* y el gran número de moléculas en la habitación es lo que hace tan enorme la diferencia de entropía entre las disposiciones desordenadas y ordenadas, y lo que hace que los resultados de baja entropía sean tan terriblemente improbables. Si usted arrojara sólo dos páginas al aire una y otra vez, usted encontraría que aterrizan en el orden correcto aproximadamente un 12,5 por 100 de las veces. Con tres páginas esto descendería hasta aproximadamente un 2 por 100 de los lanzamientos, con cuatro páginas es aproximadamente 0,3 por 100, con cinco páginas es aproximadamente un 0,03 por 100, con seis páginas es aproximadamente un 0,002 por 100, con diez páginas es 0,000000027 por 100 y con 693 páginas el porcentaje de lanzamientos que daría el orden correcto es tan pequeño —incluye tantos ceros después de la coma decimal— que el editor me ha convencido de que no utilice otra página para escribirlo explícitamente. Análogamente, si usted dejara

caer sólo dos moléculas de gas lado a lado en una botella de Coca-Cola vacía, encontraría que a temperatura ambiente su movimiento aleatorio las volvería a juntar (a menos de un milímetro una de otra), en promedio, aproximadamente en unos pocos segundos. Pero en el caso de un grupo de tres moléculas, tendría que esperar días, para cuatro moléculas tendría que esperar años, y para una gota densa inicial de un cuatrillón de molé-

culas se necesitaría un tiempo mucho mayor que la edad actual del universo para que su movimiento aleatorio y dispersivo las vuelva a juntar en un grupo pequeño y ordenado. Que los sistemas con muchos constituyentes evolucionan hacia el desorden es algo que podemos dar por cierto con más seguridad aún que la muerte y los impuestos.

Aunque quizá no sea inmediatamente evidente, ahora hemos llegado a un punto intrigante. La segunda ley de la termodinámica parece habernos dado una flecha del tiempo, *una flecha que se manifiesta cuando los sistemas físicos tienen un gran número de constituyentes.* Si usted observara una película de un par de moléculas de dióxido de carbono que han sido colocadas juntas en una pequeña caja (con un trazador que muestra los movimientos de cada una), tendría muchas dificultades para decir si la película se estaba pasando hacia delante o al revés. Las dos moléculas irían de un lado a otro, juntándose a veces, separándose otras, pero sin mostrar nunca ningún comportamiento global que distinga una dirección en el tiempo de la contraria. Sin embargo, si usted observara una película de 10^{24} moléculas de dióxido de carbono que hubieran sido colocadas en la caja (digamos que como una nube pequeña y densa de moléculas), podría determinar fácilmente si la película se estaba pasando hacia delante o a la inversa: es

abrumadoramente probable que la dirección hacia delante en el tiempo sea una en la que las moléculas de gas se dispersan uniformemente, *alcanzando una entropía cada vez mayor.* Si, en su lugar, la película mostrase moléculas de gas uniformemente dispersas que se juntan en un grupo compacto, usted reconocería inmediatamente que la estaba viendo a la inversa.

El mismo razonamiento vale esencialmente para todas las cosas que encontramos en la vida diaria —es decir, cosas que tienen un gran número de constituyentes: la flecha hacia delante en el tiempo apunta en la dirección de la entropía creciente—. Si usted observa una película de un vaso con hielo colocado en una barra, puede determinar cuál es la dirección hacia delante en el tiempo comprobando que el hielo se funde: sus moléculas de H_2O se dispersan por el vaso, alcanzando con ello una entropía más alta. Si observa una película de un huevo aplastado, puede determinar cuál es la dirección hacia delante en el tiempo comprobando que los constituyentes del huevo se hacen

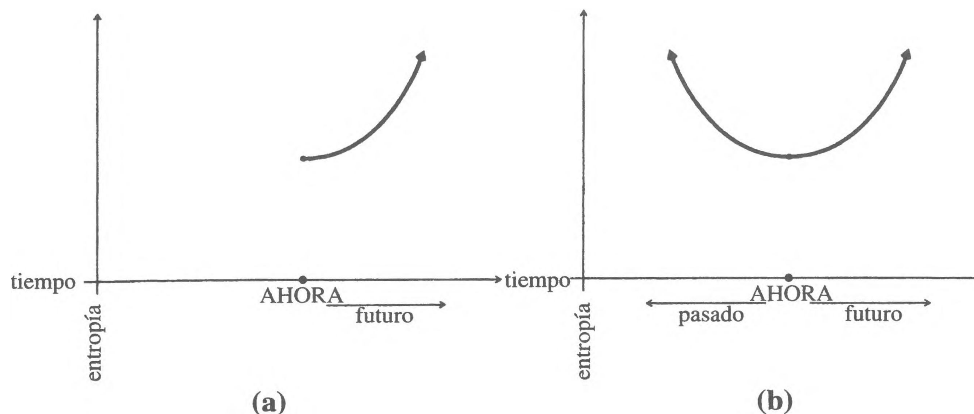


FIGURA 6.2. **(a)** Tal como se describe habitualmente, la segunda ley de la termodinámica implica que la entropía aumenta hacia el futuro de cualquier instante dado, (b) Puesto que las leyes de la Naturaleza conocida tratan las direcciones hacia atrás y hacia delante en e] tiempo de forma idéntica, la segunda ley implica en realidad que la entropía aumenta tanto hacia el futuro como hacia el pasado de cualquier instante dado.

cada vez más desordenados —que el huevo salpica y no desalpica, alcanzando así también una entropía más alta.

Como usted puede ver, el concepto de entropía proporciona una versión precisa de la conclusión «fácil *versus* difícil» que encontramos antes. Es fácil que las páginas de *Guerra y paz* caigan desordenadas porque hay muchas disposiciones desordenadas. Es difícil que las páginas caigan en orden perfecto porque sería necesario mover centenares de páginas de la forma correcta para que aterricen en la única secuencia que Tolstoi pretendió. Es fácil que un huevo salpique porque hay muchas maneras de salpicar. Es difícil que un huevo desalpique porque un enorme número de constituyentes salpicados deben moverse con perfecta coordinación para producir el resultado único y singular de un huevo prístino sobre la encimera. En el caso de objetos con muchos constituyentes,

pasar de entropía más baja a más alta —de orden a desorden— es fácil, de modo que sucede continuamente. Pasar de entropía más alta a más baja —de desorden a orden— es más difícil, de modo que sucede raramente, en el mejor de los casos.

Nótese, también, que esta flecha entrópica no es completamente rígida; no se pretende que esta definición de la dirección del tiempo sea 100 por 100 infalible. En su lugar, esta aproximación tiene una enorme flexibilidad para permitir que estos y otros sucesos ocurran también a la inversa. Puesto que la segunda ley afirma que el aumento de entropía es sólo una posibilidad estadística, y no un hecho inviolable de la Naturaleza, permite la rara posibilidad de que las páginas puedan caer en el orden numérico correcto, que las moléculas de gas puedan reunirse y reentrar en una botella, y que los huevos puedan desaplastarse. Usando las matemáticas de la entropía, la segunda ley expresa precisamente cuán poco probable son estadísticamente estos sucesos (recuerde, el enorme número en las páginas 200-201 refleja cuánto más probable es que las páginas aterricen desordenadas), pero reconoce que puede suceder.

Esto parece una historia convincente. El razonamiento estadístico y probabilista nos ha dado la segunda ley de la termodinámica. A su vez, la segunda ley nos ha proporcionado una distinción intuitiva entre lo que llamamos pasado y lo que llamamos futuro. Nos ha dado una explicación práctica de por qué las cosas en la vida diaria, cosas que están compuestas normalmente de números enormes de constituyentes, empiezan de *esta* forma y terminan de *aquélla,* mientras que nunca vemos que empiecen de *aquélla* y terminen de *ésta.* Pero en el curso de muchos años —y gracias a contribuciones importantes de físicos como lord Kelvin, Joseph Loschmidt, Henri Poincaré,

S. H. Burbury, Emst Zermelo y Willard Gibb— Ludwig Boltzmann llegó a apreciar que la historia completa de la flecha del tiempo es más sorprendente. Boltzmann se dio cuenta que aunque la entropía había iluminado aspectos importantes del rompecabezas, no había respondido a la pregunta de por qué el pasado y el futuro parecen tan diferentes. Más bien, la entropía había redefinido la cuestión de una manera importante, una manera que lleva a una conclusión inesperada.

Entropía: pasado y futuro

Antes introdujimos el dilema de pasado *versus* futuro comparando nuestras observaciones cotidianas con las propiedades de las leyes de Newton de la física clásica. Hicimos hincapié en que continuamente experimentamos una direccionalidad obvia en el modo que en las cosas se despliegan en el tiempo pero que las propias leyes tratan lo que nosotros llamamos hacia delante y hacia atrás en el tiempo en pie de igualdad. Puesto que no hay ninguna flecha dentro de las leyes de la física que asigne una dirección al tiempo, ningún puntero que señale «utilice estas leyes en esta orientación temporal pero no a la inversa», nos vemos llevados a preguntar: si las leyes que subyacen a la experiencia tratan simétricamente ambas orientaciones temporales, ¿por qué las propias experiencias tienen este sesgo temporal tan obvio, pues suceden siempre en una dirección pero no en la otra. ¿De dónde procede la direccionalidad del tiempo observada y experimentada?

Parecía que en la última sección habíamos hecho progresos, gracias a la segunda ley de la termodinámica que aparentemente distingue el futuro como la dirección en la que aumenta la entropía. Pero pensando un poco más, eso no es tan simple. Nótese que en nuestra discusión de la entropía y la segunda ley no modificamos de ninguna

manera las leyes de la física clásica. Todo lo que hicimos fue utilizar las leyes en un marco estadístico «de trazo grueso»: ignoramos los detalles finos (el orden exacto de las páginas desencuadernadas de *Guerra y paz,* las localizaciones y velocidades exactas de los constituyentes de un huevo, las localizaciones y velocidades exactas de las moléculas de CO_2 en una botella de Coca-Cola) y en su lugar centramos nuestra atención en características globales (páginas ordenadas *versus* desordenadas, huevo aplastado *versus* no-aplastado, moléculas de gas dispersas *versus* no-dispersas). Encontramos que cuando los sistemas físicos son suficientemente complicados (libros con muchas páginas, objetos frágiles que pueden romperse en muchos fragmentos, gases con muchas moléculas), hay una enorme diferencia de entropía entre sus configuraciones ordenada y desordenada. Y esto significa que hay una enorme probabilidad de que los sistemas evolucionen de menor a mayor entropía, que es un enunciado tosco de la segunda ley de la termodinámica. Pero el hecho clave que cabe advertir es que la segunda ley es una ley *derivada:* es meramente una consecuencia del razonamiento probabilista aplicado a las leyes de movimiento de Newton.

Esto nos lleva a un punto simple pero sorprendente: *puesto que las leyes de la física de Newton no tienen incorporada una orientación temporal, todo el razonamiento que hemos utilizado para argumentar que los sistemas evolucionarán de menor a mayor entropía hacia el futuro funciona igualmente cuando se aplica hacia el pasado.* Una vez más, puesto que las leyes de la física subyacentes son simétricas bajo inversión temporal, no hay forma de que distingan siquiera entre lo que llamamos el pasado y lo que llamamos el futuro. De la misma forma que no hay postes de señalización en la profunda oscuridad del espacio vacío que afirmen que esta dirección es hacia arriba y esa

dirección es hacia abajo, no hay nada en las leyes de la física clásica que diga que esta dirección es el tiempo futuro y esa dirección es el tiempo pasado. Las leyes no ofrecen una orientación temporal; ésta es una distinción a la que son completamente insensibles. Y puesto que las leyes del movimiento son responsables de cómo cambian las cosas —tanto hacia lo que llamamos el futuro como hacia lo que llamamos el pasado— el razonamiento estadístico/probabilista que hay tras la segunda ley de la termodinámica se aplica por igual en ambas direcciones temporales. Por lo tanto, *no sólo hay una aplastante probabilidad de que la entropía de un sistema físico sea más alta en lo que llamamos el futuro, sino que hay la misma aplastante probabilidad de que fuera mayor en lo que llamamos el pasado.* Ilustramos esto en la figura 6.2.

Éste es *el* punto clave para todo lo que sigue, pero es también engañosamente sutil. Un error común es que si, según la segunda ley de la termodinámica, la entropía aumenta hacia el futuro, entonces la entropía necesariamente disminuye hacia el pasado. Pero es aquí donde interviene la sutileza. La segunda ley dice realmente que si en cualquier instante de interés un sistema físico no posee la máxima entropía posible, es extraordinariamente probable que el sistema físico tenga posterior *y* anteriormente más entropía. Éste es el contenido de la figura 6.2b. Con leyes que son ciegas a la distinción pasado-versus-fu- turo tal simetría temporal es inevitable.

Ésa es la lección esencial. Nos dice que la flecha entrópica del tiempo tiene *dos puntas.* A partir de cualquier instante especificado, la flecha del aumento de entropía apunta hacia el futuro y hacia el pasado. Y eso es lo que hace decididamente complicado proponer la entropía como la explicación de la flecha de-dirección-única del tiempo de la experiencia.

Pensemos en lo que la flecha entrópica de dos puntas implica en términos concretos. Si es un día caluroso y usted ve cubos de hielo parcialmente fundidos en un vaso de agua, tiene la plena confianza de que media hora más tarde los cubos estarán más fundidos, puesto que cuanto más fundidos están, más entropía tienen.**[6.11]** Pero usted debería tener exactamente la misma confianza en que media hora antes estaban también más fundidos, puesto que *exactamente* el mismo razonamiento estadístico implica que la entropía debería aumentar hacia el pasado. Y la misma conclusión se aplica a los muchos otros ejemplos que encontramos todos los días. Su seguridad de que la entropía aumenta hacia el futuro —desde moléculas de gas parcialmente dispersas hasta una dispersión mayor, o de páginas parcialmente ordenadas que se barajan más— debería ser *exactamente* la misma que la de que la entropía era también mayor en el pasado.

Lo molesto es que la mitad de estas conclusiones parecen completamente equivocadas. El razonamiento entrópico lleva a conclusiones precisas y razonables cuando se aplica en una dirección temporal, hacia lo que llamamos el futuro, pero da conclusiones aparentemente imprecisas y ridiculas cuando se aplica hacia lo que llamamos el pasado. Los vasos de agua con cubos de hielo medio fundidos no empiezan normalmente como vasos de agua sin ningún cubo de hielo en los que las moléculas de agua se juntan y se enfrían para dar trozos de hielo, sólo para empezar a fundirse de nuevo. Las páginas desencuadernadas de *Guerra y paz* no empiezan normalmente con un desorden numérico completo y se hacen menos desordenadas tras lanzamientos posteriores, sólo para empezar a desordenarse de nuevo. Y volviendo a la cocina, los huevos no empiezan en general aplastados, y luego se recomponen

en un huevo entero prístino, sólo para aplastarse algún tiempo después.

¿O sí lo hacen?

Siguiendo las matemáticas

Siglos de investigación científica han mostrado que las matemáticas proporcionan un lenguaje poderoso e incisivo para analizar el universo. De hecho, la historia de la ciencia moderna está repleta de ejemplos en los que las matemáticas hicieron predicciones que parecían contradecir tanto la intuición como la experiencia (que el universo contiene agujeros negros, que el universo tiene antimateria, que partículas lejanas pueden estar entrelazadas, y demás) pero que los experimentos y las observaciones fueron en última instancia capaces de confirmar. Tales desarrollos han causado profunda impresión en la cultura de la física teórica. Los físicos se han dado cuenta de que las matemáticas, cuando se utilizan con suficiente cuidado, son un sendero probado hacia la verdad.

Así que cuando un análisis matemático de las leyes de la Naturaleza muestra que la entropía debería ser mayor hacia el futuro *y* hacia el pasado de cualquier instante dado, los físicos no lo desprecian. En su lugar, algo parecido a un juramento hipocrático de los físicos anima a los investigadores a mantener un sano y profundo escepticismo respecto a las verdades aparentes de la experiencia humana y, con la misma actitud escéptica, seguir diligentemente las matemáticas y ver adonde llevan. Sólo entonces podemos valorar e interpretar adecuadamente cualquier desajuste remanente entre la ley física y el sentido común.

Para este fin, imaginemos que son las 22.30 y que durante la última media hora usted ha estado mirando un vaso de agua con hielo (es una larga noche en el bar), observando cómo los cubos se funden lentamente dando formas más pequeñas e irregulares. Usted no tiene absolutamente ninguna duda de que media hora antes el camarero puso cubos de hielo completamente formados en el vaso; usted no tiene duda porque confía en su memoria. Y si, por algún azar, su confianza con respecto a lo que sucedió durante la última media hora no fuera muy firme, siempre puede preguntar al tipo de al lado, que también estuvo observando cómo se fundían los cubos de hielo (es una noche *realmente* lenta en el bar), o quizá comprobar el vídeo grabado por la cámara de vigilancia del bar, y ambos confirmarían que su memoria es exacta. Si usted se preguntara entonces qué espera que suceda con los cubos de hielo durante la próxima media hora, probablemente concluiría que continuarían fundiéndose. Y si usted estuviera suficientemente familiarizado con el concepto de entropía, explicaría su predicción apelando a la aplastante probabilidad de que la entropía aumente en el futuro respecto a lo que usted ve, exactamente ahora a las 22.30. Todo eso tiene buen sentido y encaja con nuestra intuición y experiencia.

Pero como hemos visto, tal razonamiento entrópico — razonamiento que simplemente dice que es más probable que las cosas estén desordenadas puesto que hay más maneras de estar desordenado, razonamiento que es demostrablemente poderoso para explicar cómo evolucionan las cosas hacia el futuro— afirma que es igualmente probable que la entropía haya sido más alta en el pasado. Esto significaría que los cubos medio fundidos que usted ve a las 22.30 habrían estado realmente más fundidos en instantes anteriores; significaría que a las 22.00

no habían empezado como cubos de hielo sólido sino que, por el contrario, se formaron lentamente a partir de agua a temperatura ambiente mientras se acercaban a las 22.30, con la misma seguridad con que se fundirán lentamente en agua a temperatura ambiente mientras se acerquen a las 23.00.

Sin duda eso suena extraño —o, quizá diría usted, absurdo—. A decir verdad, no sólo las moléculas de H_2O en un vaso de agua a temperatura ambiente tendrían que agruparse espontáneamente en cubos de hielo formados sino que los bits digitales en la cámara de vigilancia, así como las neuronas de su cerebro y las del cerebro del tipo que está al lado, tendrían que ordenarse espontáneamente a las 22.30 para atestiguar que había un conjunto de cubos de hielo completamente formados que se fundieron, incluso si nunca estuvieron. Pero a esta extraña conclusión es adonde lleva una aplicación fiel del razonamiento entrópico —el mismo razonamiento que usted acepta sin duda para explicar por qué el hielo medio fundido que ve a las 22.30 sigue fundiéndose hacia las 23.00— cuando se aplica de la forma con simetría temporal dictada por las leyes de la física. Éste es el problema de tener leyes fundamentales de movimiento sin ninguna distinción incorporada entre pasado y futuro, leyes cuyas matemáticas tratan el futuro y el pasado de cualquier instante dado exactamente de la misma manera[6.12]

Descanse con la seguridad de que pronto encontraremos una salida del extraño lugar al que nos ha llevado un uso igualitario del razonamiento entrópico; no voy a tratar de convencerle de que sus recuerdos y registros son de un pasado que nunca ocurrió (disculpas para los fans de *Matrix).* Pero encontraremos muy útil señalar precisamente la separación entre intuición y leyes matemáticas. De modo que dejémoslo seguir.

Un barrizal

Su intuición rechaza un pasado con mayor entropía porque, visto en el desarrollo normal de los sucesos hacia delante en el tiempo, requeriría un crecimiento espontáneo del orden: moléculas de agua enfriándose espontáneamente hasta cero grados Celsius y convirtiéndose en hielo, cerebros que adquieren espontáneamente recuerdos de cosas que no sucedieron, cámaras de vídeo que producen espontáneamente imágenes de cosas que nunca fueron, y así sucesivamente, todas las cuales parecen extraordinariamente poco probables —una explicación del pasado de la que incluso Oliver Stone se burlaría—. En este punto, las leyes físicas y las matemáticas de la entropía coinciden plenamente con su intuición. Semejante secuencia de sucesos, cuando se ve en la dirección hacia delante en el tiempo desde las 22.00 hasta las 22.30 va contra el núcleo de la segunda ley de la termodinámica —da como resultado una disminución de la entropía— *y* así, aunque no imposible, es muy improbable.

Por el contrario, su intuición y experiencia le dicen que una secuencia de sucesos un poco más probable es que los cubos de hielo que estaban completamente formados a las 22.00 se fundieron parcialmente para dar lo que usted ve en su vaso, precisamente ahora, a las 22.30. Pero en este punto, las leyes de la física y las matemáticas de la entropía sólo coinciden en parte con sus expectativas. Las matemáticas y la intuición coinciden en que si realmente había cubos de hielo completamente formados a las 22.00, entonces la secuencia más probable de sucesos sería que se fundieran para dar los cubos más pequeños que usted ve a las 22.30: el incremento de la entropía resultante está de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica y con la experiencia. Pero donde las matemáticas y la intuición se

separan es en que nuestra intuición, a diferencia de las matemáticas, no logra tener en cuenta la probabilidad, o carencia de ella, de tener realmente cubos de hielo completamente formados a las 22.00, *dada la observación que estamos tomando como incuestionable, como plenamente digna de confianza, de que precisamente ahora, a las 22.30, usted ve cubos medio fundidos.*

Éste es el punto central, de modo que déjeme explicarlo. La lección principal de la segunda ley de la termodinámica es que los sistemas físicos tienen una abrumadora tendencia a estar en configuraciones de alta entropía porque hay muchas maneras de realizar tales estados. Y una vez en tales estados de alta entropía, los sistemas físicos tienen una abrumadora tendencia a permanecer en ellos. La entropía alta es el estado de ser natural. Usted nunca debería sorprenderse o sentir la necesidad de explicar por qué cualquier sistema físico está en un estado de alta entropía. Tales estados son la norma. Por el contrario, lo que necesita explicación es por qué cualquier sistema físico dado está en un estado de orden, un estado de baja entropía. Ciertamente pueden darse. Pero desde el punto de vista de la entropía, tales estados ordenados son raras aberraciones que reclaman una explicación. Así que un hecho dentro del episodio que estamos tomando como incuestionablemente cierto —su observación a las 22.30 de cubos de hielo parcialmente formados de baja entropía— es un hecho que necesita una explicación.

Y desde el punto de vista de la probabilidad, es absurdo explicar este estado de baja entropía apelando a un estado de entropía aún *menor,* un estado *aún menos probable,* en el que, a las 22.00, había cubos de hielo *aún más ordenados, de mayor tamaño,* que eran observados en un ambiente *más* ordenado, *más* prístino. Por el contrario, es enormemente más probable que las cosas empezaran en un

estado de alta entropía totalmente normal y nada sorprendente: un vaso de agua líquida uniforme sin nada de hielo. Luego, a través de una improbable pero ocasionalmente esperable fluctuación estadística, el vaso de agua fue contra el núcleo de la segunda ley y evolucionó hacia un estado de menor entropía en el que aparecieron cubos de hielo a medio formar. Esta evolución, aunque requiere procesos raros y poco familiares, evita por completo el estado aún más raro, aún menos probable, aún de menor entropía, en el que hay cubos de hielo completamente formados. En todo instante entre las 22.00 y las 22.30 esta evolución extraña tiene entropía *más alta* que el escenario de fusión de hielo normal, como usted puede ver en la figura 6.3, y así encaja con la observación aceptada a las 22.30 de una manera que es más *probable* —enormemente más probable— que el escenario en el que se fundían cubos de hielo plenamente formados.[6.13] Éste es el quid de la cuestión. [*14]

Boltzmann sólo necesitó un pequeño paso para darse cuenta que la totalidad del universo está sometida a este mismo análisis. Cuando usted mira al universo precisamente ahora, lo que ve refleja una gran cantidad de organización biológica, estructura química y orden físico. Aunque el universo podría ser un amasijo totalmente desorganizado, no lo es. ¿Por qué es así? ¿De dónde procede el orden? Bien, igual que sucede con los cubos de hielo, desde el punto de vista de la probabilidad es extraordinariamente improbable que el universo que vemos evolucionara a partir de un estado aún más ordenado —aún menos probable— en el pasado distante que se ha desarrollado lentamente

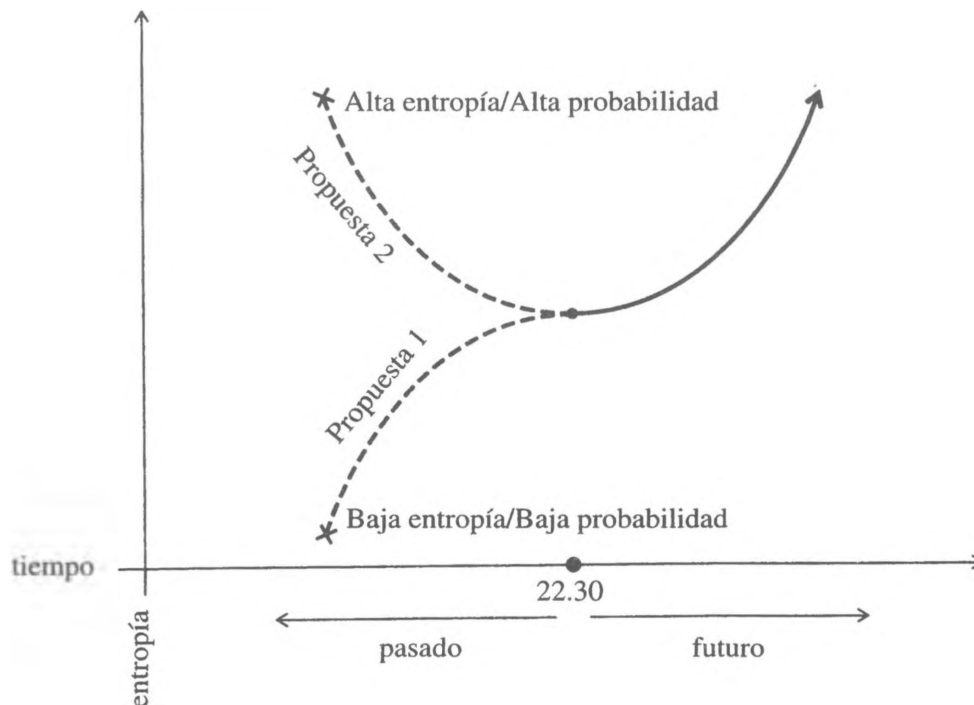


FIGURA 6.3. Una comparación entre dos propuestas de cómo llegaron los cubos de hielo a su estado medio fundido, precisamente ahora, a las 22.30. La propuesta 1 se ajusta a sus recuerdos del hielo fundiéndose, pero requiere un punto de partida de entropía relativamente baja a las 22.00. La propuesta 2 cuestiona sus recuerdos pues en ésta el hielo medio fundido que usted ve a las 22.30 se ha formado a partir de vaso de agua que empieza en una configuración de desorden altamente probable y de alta entropía a las 22.00. En cada paso del camino hacia las 22.30, la propuesta 2 implica estados que son más probables que los de la propuesta 1 —porque, como usted puede ver en la gráfica, tienen mayor entropía— y la propuesta 2 es estadísticamente favorecida.

hasta su forma actual. Más bien, puesto que el cosmos tiene tantos constituyentes, las escalas de lo ordenado *versus* lo desordenado están enormemente ampliadas. Y por ello lo que es cierto en el bar es muchísimo más cierto para el universo entero: es *mucho* más probable —inimaginablemente más probable— que el universo entero que ahora vemos surgiera como una fluctuación estadísticamente rara a partir de una configuración normal,

poco sorprendente y completamente desordenada, de alta entropía.

Considérelo de esta manera: si usted arroja un puñado de monedas una y otra vez, más pronto o más tarde todas caerán de cara. Si usted tiene la paciencia casi infinita necesaria para arrojar al aire una y otra vez las páginas de *Guerra y paz,* más pronto o más tarde caerán en el orden numérico correcto. Si usted espera con su botella abierta de Coca-Cola, más pronto o más tarde la vibración aleatoria de las moléculas de dióxido de carbono hará que vuelvan a entrar en la botella. Y, en el ordago Boltzmann, si el universo espera lo suficiente —durante casi una eternidad, quizá— su estado normal, de alta entropía, altamente probable y totalmente desordenado se agrupará, más pronto o más tarde, a través de sus propios golpes, empujones y corrientes aleatorias de partículas y radiación, en la configuración que todos vemos precisamente ahora. Nuestros cuerpos y cerebros emergerían completamente formados a partir del caos —provistos de recuerdos, conocimientos y habilidades— incluso si en el pasado que parecen reflejar nunca hubiese ocurrido realmente. Todo lo que conocemos, todo lo que valoramos, no sería nada más que una rara pero ocasionalmente esperable fluctuación estadística que interrumpe momentáneamente una casi eternidad de desorden. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 6.4.



Tiempo

FIGURA 6.4. Una gráfica esquemática de la entropía total del universo a lo largo del tiempo. La gráfica muestra que el universo pasa la mayor parte de su tiempo en un estado de desorden total —un estado de alta entropía— y de cuando en cuando experimenta fluctuaciones a estados de grados de orden variable, estados variables de menor entropía. Cuanto mayor es el descenso de entropía, menos probable es la fluctuación. Descensos significativos en la entropía, como los del tipo de orden en el universo actual, son extraordinariamente poco probables y sucederían muy raramente.

Dar un paso atrás

Cuando tropecé con esta idea por primera vez hace muchos años, fue para mí una conmoción. Hasta ese momento, yo había pensado que entendía el concepto de entropía bastante bien, pero el hecho era que, siguiendo el enfoque de los libros de texto que había estudiado, yo sólo había considerado las implicaciones de la entropía para el futuro. Y, como acabamos de ver, aunque la entropía aplicada hacia el futuro confirma nuestra intuición y nuestra experiencia, la entropía aplicada hacia el pasado las contradice totalmente. No era tan malo como descubrir repentinamente que uno ha sido traicionado por un amigo de la infancia, pero para mí fue algo muy parecido.

De todas formas, a veces es bueno no cambiar de juicio demasiado rápidamente, y el fracaso aparente de la entropía para satisfacer las expectativas ofrece un ejemplo. Como probablemente está usted pensando, la idea de que todo lo que nos es familiar acaba de nacer es tan atractiva como difícil de tragar. No se trata «meramente» de que esta explicación del universo cuestione la veracidad de todo lo que mantenemos que es real e importante. También deja cuestiones críticas sin responder. Por ejemplo, cuanto más ordenado es hoy el universo —más profundo es el mínimo

en la figura 6.4— más sorprendente e improbable es la aberración estadística necesaria para que nazca. De modo que si el universo pudiera haberse ahorrado cualquier rincón, haciendo que las cosas parezcan más o menos como las vemos ahora aunque reduciendo la cantidad real de orden, el razonamiento probabilista nos lleva a creer que lo habría hecho. Pero cuando examinamos el universo, parece que se han perdido muchas oportunidades para ello, puesto que hay muchas cosas que están más ordenadas que lo que tienen que estar. Si Michael Jackson nunca hubiera grabado *Thriller* y los millones de copias de este álbum ahora distribuidas por todo el mundo fueran parte de una fluctuación aberrante hacia una menor entropía, la aberración habría sido mucho menos extrema si sólo se hubieran formado un millón o medio millón o sólo unos pocos álbumes. Si la evolución nunca hubiese sucedido y nosotros los seres humanos hubiéramos llegado aquí por un salto aberrante hacia una entropía más baja, la aberración habría sido mucho menos extrema si no hubiera un registro fósil evolutivo tan consistente y ordenado. Si el *big bang* nunca hubiera sucedido y los más de 100.000 millones de galaxias que vemos ahora surgieron como un salto aberrante hacia una entropía más baja, la aberración habría sido menos extrema si hubiera 50.000 millones, o 5.000, o sólo un puñado, o tan sólo una galaxia. Y así, si la idea de que nuestro universo es una fluctuación estadística —un feliz golpe de suerte— tiene alguna validez, habría que abordar cómo y por qué el universo se pasó en tanto y consiguió un estado de *tan* baja entropía.

Aún más urgente, si usted no puede confiar realmente en sus recuerdos y registros, entonces tampoco puede confiar en las leyes de la física. Su validez descansa en numerosos experimentos cuyos resultados positivos están atestiguados solamente por esos mismos recuerdos y registros. Así que

todo el razonamiento basado en la simetría bajo inversión temporal de las leyes aceptadas de la física quedaría totalmente destruido, minando con ello nuestra comprensión de la entropía y la base entera de la discusión actual. Al aceptar la conclusión de que el universo que conocemos es una rara pero no imposible fluctuación estadística a partir de una configuración de desorden total, nos vemos llevados rápidamente a un atolladero en el que perdemos cualquier comprensión, incluyendo la cadena misma de razonamiento que nos llevó a considerar una explicación tan singular en primer lugar.

Así pues, al suspender la incredulidad y seguir diligentemente las leyes de la física y las matemáticas de la entropía —conceptos que en combinación nos dicen que es abrumadoramente probable que el desorden aumente tanto hacia el futuro como hacia el pasado de cualquier instante dado— nos hemos metido hasta el cuello en un terreno fangoso. Y aunque eso pudiera no sonar agradable, es muy bueno por dos razones. En primer lugar, muestra con precisión por qué la desconfianza en los recuerdos y registros —algo que desechamos intuitivamente— no tiene sentido. En segundo lugar, al llegar a un punto donde todo nuestro andamiaje analítico está a punto de colapsar, nos damos cuenta, obligadamente, de que debemos haber dejado algo crucial fuera de nuestro razonamiento.

Por consiguiente, para evitar el abismo explicatorio, nos preguntamos: ¿qué nueva idea o concepto, más allá de la entropía y de la simetría temporal de las leyes de la Naturaleza, necesitamos para volver a confiar en nuestros recuerdos y nuestros registros —nuestra experiencia de cubos de hielo a temperatura ambiente que se funden y no se desfunden, de leche y café que se mezclan pero no se desmezclan, de huevos que se aplastan pero no se desaplastan—? En resumen, ¿dónde nos vemos llevados si

tratamos de explicar un despliegue asimétrico de sucesos en el espaciotiempo, con entropía más alta en nuestro futuro pero entropía más baja en nuestro pasado? ¿Es posible?

Lo es. Pero sólo si las cosas fueron muy especiales al principio.[6.14]

El huevo, la gallina y el *big bang*

Para ver lo que esto significa, tomemos el ejemplo de un huevo prístino, de baja entropía, completamente formado. ¿Cómo nació este sistema físico de baja entropía? Bien, poniendo de nuevo nuestra confianza en los recuerdos y los registros, todos sabemos la respuesta. El huevo vino de una gallina. Y esa gallina vino de un huevo, que vino de una gallina, que vino de un huevo y así sucesivamente. Pero, como resaltó con más fuerza el matemático inglés Roger Penrose,[6.15] esta historia del huevo y la gallina nos enseña en realidad algo profundo y nos lleva a algún lugar definido.

Una gallina, o para el caso cualquier ser vivo, es un sistema físico con un orden sorprendentemente alto. ¿De dónde procede esta organización y cómo se sostiene? Una gallina está viva y, en particular, vive el tiempo suficiente para poner huevos, porque come y respira. El alimento y el oxígeno proporcionan las materias primas de las que los seres vivos extraen la energía que necesitan. Pero hay un aspecto crítico de esta energía que debe ser resaltado si queremos entender realmente lo que está pasando. En el curso de su vida, una gallina que sigue viva toma tanta energía en forma de alimento como devuelve al ambiente, fundamentalmente en forma de calor y otros residuos generados por sus procesos metabólicos y actividades

ovíparas. Si no existiese ese equilibrio de energía entrante y energía saliente, la gallina se haría cada vez más grande.

El punto esencial, sin embargo, es que no todas las formas de energía son iguales. La energía que devuelve una gallina al entorno en forma de calor está altamente desordenada —a menudo da como resultado que algunas moléculas de aire en un lado o en otro tengan una mayor agitación que la que tendrían de lo contrario—. Dicha energía tiene alta entropía —es difusa y está entremezclada con el entorno— y por ello no puede ser fácilmente aprovechada para cualquier fin útil. Por el contrario, la energía que toma la gallina de su alimento tiene baja entropía y es rápidamente aprovechada para actividades importantes que sostienen la vida. De modo que la gallina y, de hecho, toda forma viva es un conducto para tomar energía de baja entropía y devolver energía de alta entropía.

Esta idea hace retroceder otro paso la cuestión de dónde se origina la baja entropía de un huevo. ¿Cómo es que la energía de la gallina, el alimento, tiene una entropía tan baja? ¿Cómo explicamos esta aberrante fuente de orden? Si el alimento es de origen animal, nos vemos llevados de nuevo a la cuestión inicial de cómo tienen los animales una entropía tan baja. Pero si seguimos la cadena alimenticia, llegamos finalmente a animales (como es mi caso) que sólo comen plantas. ¿Cómo mantienen las plantas y sus productos frutales y verduras comestibles su baja entropía? Mediante la fotosíntesis, las plantas utilizan la luz del Sol para descomponer el dióxido de carbono ambiente en oxígeno, que es devuelto al entorno, y carbono, que utilizan las plantas para crecer y florecer. De modo que podemos rastrear las fuentes no animales de energía de baja entropía hasta llegar al Sol.

Esto retrotrae un paso más la cuestión de explicar la baja entropía: ¿de dónde procedía nuestro Sol altamente ordenado? El Sol se formó hace aproximadamente 5.000 millones de años a partir de una nube de gas inicialmente difusa que empezó a arremolinarse y a agruparse bajo la atracción gravitatoria mutua de todos sus constituyentes. A medida que la nube de gas se hacía más densa, la atracción gravitatoria de unas partes sobre otras se hacía más fuerte, haciendo que la nube colapsara más sobre sí misma. Y a medida que la gravedad comprimía más la nube, ésta se hacía más caliente. Finalmente, se hizo suficientemente caliente para desencadenar procesos nucleares que generaban suficiente radiación que fluía hacia fuera para contener la contracción gravitatoria del gas. Había nacido una estrella caliente, estable y brillante.

De modo que ¿de dónde provenía la nube de gas difusa? Probablemente se formó a partir de los residuos de estrellas más viejas que llegaron al final de su vida, se hicieron supernovas y eyectaron sus contenidos al espacio. ¿De dónde procedía el gas difuso responsable de estas primeras estrellas? Pensamos que el gas se formó en el período que siguió al *big bang.* Nuestras teorías más refinadas del origen del universo —nuestras teorías *cosmológicas* más refinadas — nos dicen que cuando el universo tenía un par de minutos, estaba lleno de un gas caliente *casi uniforme* compuesto de aproximadamente un 75 por 100 de hidrógeno, un 23 por 100 de helio y pequeñas cantidades de deute- rio y litio. El punto esencial es que este gas que llenaba el universo tenía una entropía extraordinariamente *baja.* El *big bang* puso en marcha el universo en un estado de baja entropía, y ese estado parece ser la fuente del orden que vemos actualmente. En otras palabras, *el orden actual es una reliquia cosmológica.* Discutamos con más detalle esta importante idea.

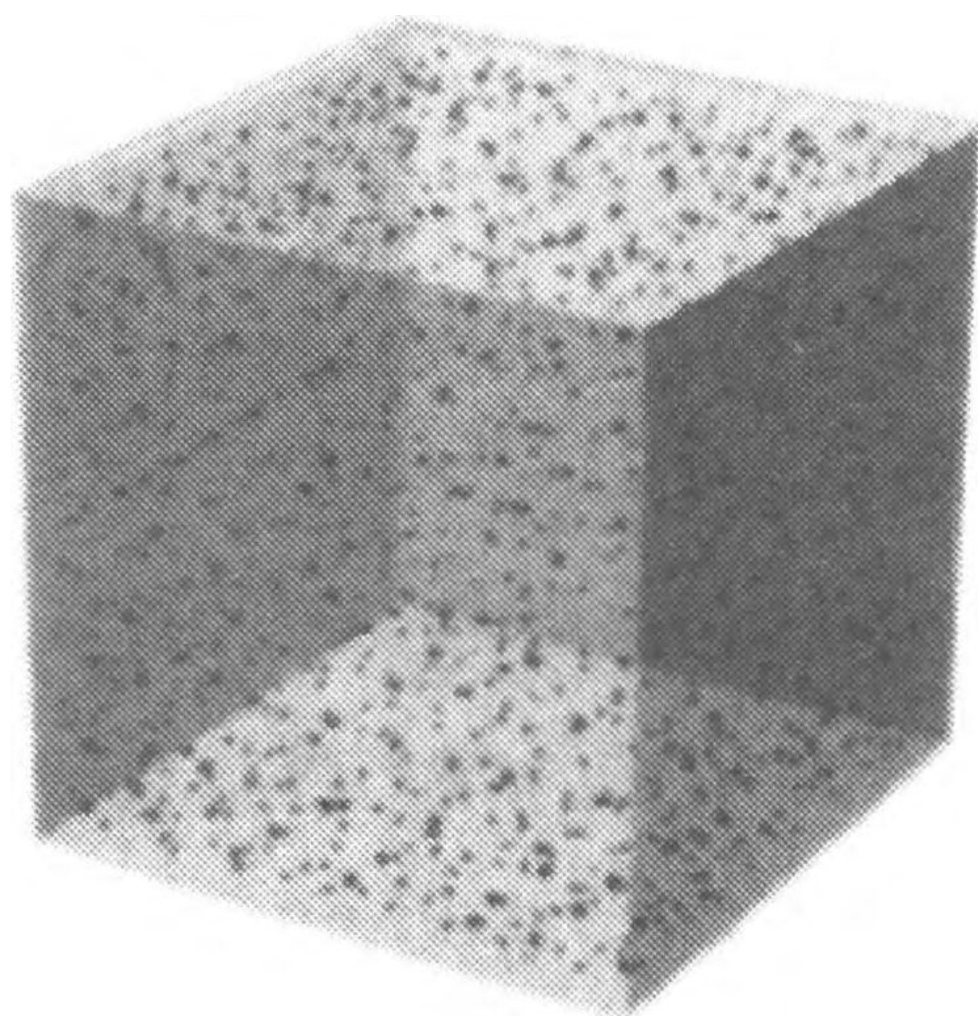
Entropía y gravedad

Puesto que teoría y observación muestran que pocos minutos después del *big bang* el gas primordial estaba uniformemente disperso por el universo joven, usted podría pensar, dada nuestra discusión anterior de la Coca-Cola y las moléculas de dióxido de carbono, que el gas primordial estaba en un estado desordenado de alta entropía. Pero esto no resulta ser cierto. Nuestra primera discusión de la entropía ignoraba por completo la gravedad, algo razonable porque la gravedad apenas desempeña un papel en el comportamiento de la mínima cantidad de gas que sale de una botella de Coca-Cola. Y con esta hipótesis encontramos que el gas disperso de manera uniforme tiene alta entropía. Pero cuando la gravedad es importante, la historia es muy diferente. La gravedad es una fuerza universalmente atractiva; por ello, si usted tiene una masa de gas suficientemente grande, cada región del gas atraerá a todas las demás y esto hará que el gas se rompa en grumos, de forma parecida a como la tensión superficial hace que el agua derramada sobre una hoja de papel impermeable se rompa en gotas. Cuando la gravedad interviene, como lo hacía en el universo primitivo de alta densidad, la aglomeración —no la uniformidad— es la norma. Es el estado al que tiende a evolucionar un gas, como se ilustra en la figura 6.5.

Incluso si los grumos parecen estar más ordenados que el gas inicialmente difuso —de la misma forma que una habitación de juegos con juguetes que están guardados en cajones está más ordenada que una en la que los juguetes están uniformemente desperdigados por el suelo— al calcular la entropía usted tiene que contar las contribuciones de todas las fuentes. En el caso de la habitación, la entropía disminuye al pasar de los juguetes

desperdigados a su «agrupación» en cajones que está más que compensada por el aumento de entropía de la grasa quemada y el calor generado por los padres que pasan horas limpiando y ordenando todo. Análogamente, en el caso de la nube de gas inicialmente difusa usted encuentra que la disminución de entropía por la formación de grumos ordenados está más que compensada por el calor generado cuando se comprime el gas y, en definitiva, por la enorme cantidad de calor y luz liberados cuando empiezan a producirse los procesos nucleares.

Éste es un punto importante que es pasado por alto a veces. La tendencia aplastante hacia el desorden no significa que no puedan formarse estructuras ordenadas como estrellas y planetas, o formas de vida ordenadas como plantas y animales. Pueden hacerlo. Y obviamente lo hacen. Lo que implica la segunda ley de la termodinámica es que en la formación de orden hay generalmente una generación de desorden que-compensa-con-creces. La hoja de balance de la entropía sigue estando en números negros incluso si ciertos constituyentes se han hecho más ordenados. Y de las fuerzas fundamentales de la Naturaleza, la gravedad es la que explica esta característica de la entropía. Puesto que la gravedad opera a lo largo de enormes distancias y es universalmente atractiva, ella instiga la formación de los grumos ordenados —estrellas— que devuelven la luz que vemos en un cielo nocturno despejado, manteniendo el balance neto del aumento de entropía.



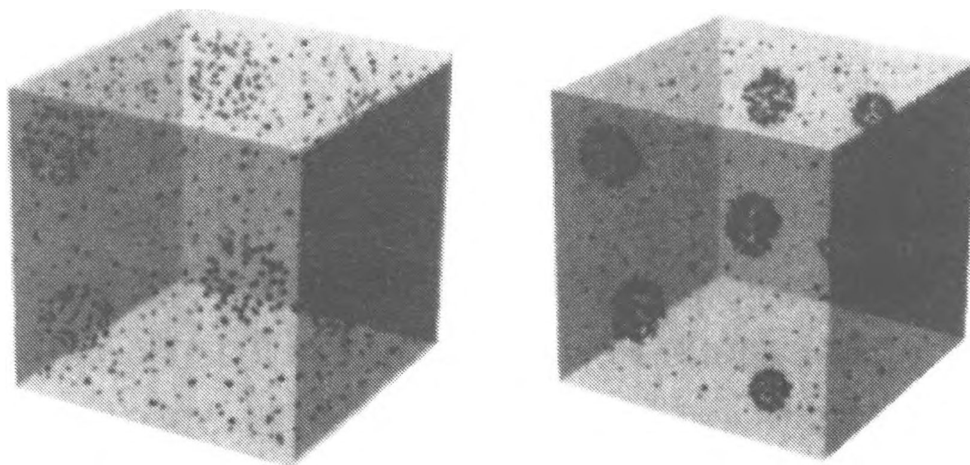


FIGURA 6.5. En volúmenes enormes de gas, cuando la gravedad cuenta, átomos y moléculas evolucionan desde una configuración suave y uniformemente dispersa hasta otra que implica grumos mayores y más densos.

Cuanto más comprimida, densa y masiva sea la nube de gas, mayor es la entropía global. Los agujeros negros, la forma más extrema de agolpamiento y compresión gravitatoria en el universo, lleva esto al límite. La atracción gravitatoria de un agujero negro es tan intensa que nada, ni siquiera la luz, puede escapar, lo que explica por qué los agujeros negros son negros. Así pues, a diferencia de las estrellas ordinarias, los agujeros negros mantienen tozudamente toda la entropía que producen: nada de ella puede escapar de la poderosa garra gravitatoria del agujero negro.[6.16] De hecho, como discutiremos en el capítulo 16, nada en el universo contiene más desorden —más entropía— que un agujero negro.[*15] Esto tiene buen sentido intuitivo: alta entropía significa que muchos reordenamientos de los constituyentes de un objeto pasan inadvertidos. Puesto que no podemos ver dentro de un agujero negro, nos es imposible detectar cualquier

reordenamiento de sus constituyentes —cualesquiera que dichos constituyentes puedan ser— y por ello los agujeros negros tienen máxima entropía. Cuando la gravedad contrae sus músculos al límite, se hace el generador más eficaz de entropía en el universo conocido.

Hemos llegado lo más lejos que podemos. *La fuente de orden final, de baja entropía, debe ser el propio* big bang. Por alguna razón, en lugar de estar lleno de contenedores gigantescos de entropía, tales como agujeros negros, como esperaríamos a partir de consideraciones probabilistas, el universo naciente estaba lleno de una mezcla caliente y uniforme de hidrógeno y helio. Aunque esta configuración tiene alta

entropía cuando las densidades son tan bajas que podemos ignorar la gravedad, la situación es otra cuando la gravedad no puede ser ignorada; entonces, dicho gas uniforme tiene entropía extraordinariamente baja. En comparación con los agujeros negros, el gas difuso y casi uniforme estaba en un estado de entropía extraordinariamente baja. Desde entonces, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, la entropía global del universo ha estado haciéndose cada vez mayor; la cantidad total de desorden ha estado aumentando poco a poco. Al cabo de aproximadamente 1.000 millones de años la gravedad hizo que el gas primordial se aglutinase, y los grumos formaron finalmente estrellas, galaxias y algunos grumos más ligeros que se convirtieron en los planetas. Al menos uno de estos planetas tenía una estrella próxima que proporcionaba una fuente de entropía relativamente baja que permitió que se desarrollaran formas de vida de baja entropía, y entre tales formas de vida había casualmente una gallina que puso un huevo que llegó hasta la encimera de su cocina y, para su pesar, ese huevo siguió la trayectoria implacable hacia un estado de entropía más alta

rodando por la encimera y aplastándose contra el suelo. El huevo, más que desaplastarse, se aplasta porque está siguiendo la tendencia hacia una entropía más alta que se inició en el estado de entropía extraordinariamente baja con el que empezó el universo. Un orden increíble al principio es lo que puso todo en marcha, y desde entonces hemos estado viviendo gracias al despliegue gradual hacia un desorden más alto.

Ésta es la sorprendente conexión a la que nos ha conducido todo el capítulo. *Un huevo aplastado nos dice algo profundo sobre el* big bang. Nos dice que el *big bang* dio lugar a un cosmos naciente extraordinariamente ordenado.

La misma idea se aplica a todos los demás ejemplos. La razón por la que arrojar al aire las páginas recién desencuadernadas de *Guerra y paz* da como resultado un estado de mayor entropía es que ellas empezaron en una forma altamente ordenada de baja entropía. Su forma ordenada inicial las hacía propicias para un aumento de entropía. Por el contrario, si las páginas estuvieran inicialmente sin ningún orden numérico, arrojarlas al aire apenas supondría una diferencia por lo que se refiere a la entropía. De modo que, una vez más, la pregunta es: ¿cómo llegaron a estar tan ordenadas? Bien, Tolstoi las escribió para ser presentadas en ese orden y el impresor y el encuadernador siguieron sus instrucciones. Y los cuerpos y mentes altamente ordenados de Tolstoi y los editores del libro, que les permitieron, a su vez, crear un volumen de tan alto orden, pueden explicarse siguiendo la misma cadena de razonamiento que acabamos de seguir para un huevo, que una vez más nos devuelve al *big bang.* ¿Qué pasa con los cubos de hielo parcialmente fundidos que usted vio a las 22.30? Ahora que tenemos recuerdos y registros fiables, usted recuerda que justo antes de las 22.00 el camarero

puso en su vaso cubos de hielo totalmente formados. Él sacó los cubos de hielo de un congelador, que fue diseñado por un ingeniero inteligente y fabricado por hábiles operarios, todos los cuales fueron capaces de crear algo de un orden tan alto porque ellos mismos son formas de vida altamente ordenadas. Y de nuevo, podemos rastrear secuencialmente su orden hasta el origen altamente ordenado del universo.

El ingrediente crítico

La revelación a la que hemos llegado es que podemos confiar en nuestros recuerdos de un pasado con menor, y no mayor, entropía sólo si el *big bang* —el proceso, suceso o contingencia que hizo nacer al universo— puso en marcha al universo en un estado extraordinariamente especial y altamente ordenado de baja entropía. Sin ese ingrediente crítico, nuestra anterior comprensión de que la entropía debería aumentar hacia el futuro tanto como hacia el pasado de cualquier instante dado nos llevaría a concluir que todo el orden que vemos surgió de una fluctuación casual a partir de un estado desordenado ordinario de alta entropía, una conclusión que, como hemos visto, socava el propio razonamiento sobre la que está basada. Pero al incluir en nuestro análisis el improbable punto de partida de baja entropía del universo, vemos ahora que la conclusión correcta es que la entropía aumenta hacia el futuro, puesto que el razonamiento probabilista opera plenamente y sin ninguna restricción en esa dirección; pero la entropía no aumenta hacia el pasado, puesto que *ese* uso de la probabilidad entraría en conflicto con nuestra nueva condición de que el universo empezó en un estado de baja, y no alta, entropía.[6.17] Así pues, las condiciones en el

nacimiento del universo son críticas para dirigir la flecha del tiempo. El futuro es la dirección de entropía creciente. *La flecha del tiempo —el hecho de que las cosas empiezan de esta manera y terminan de aquélla pero nunca empiezan de aquélla y terminan de ésta— empezó su vuelo en el estado altamente ordenado y de baja entropía en que se encontraba el universo en su origen.*[6.18]

El enigma restante

Que el universo primitivo fija la dirección de la flecha del tiempo es una conclusión maravillosa y gratificante, pero no hemos acabado. Todavía queda un enorme enigma. ¿Cómo es posible que el universo empezara en una configuración tan altamente ordenada, poniendo en marcha las cosas de modo que durante miles de millones de años todo pudiera evolucionar lentamente, pasando por configuraciones menos ordenadas, hacia una entropía cada vez mayor? No perdamos de vista lo extraordinario que es esto. Como subrayamos, desde el punto de vista de la probabilidad es mucho más probable que los cubos de hielo medio fundidos que usted vio a las 22.30 estuvieran allí porque un golpe de suerte estadístico actuó en un vaso de agua líquida, y no que tuvieran su origen en el incluso menos probable estado de cubos de hielo formados. Y lo que es cierto para los cubos de hielo es muchísimo más cierto para el universo entero. Hablando en términos de probabilidades, es inimaginablemente más probable que todo lo que vemos ahora en el universo surgiera de una rara pero ocasionalmente esperable aberración estadística a partir del desorden total, y no que haya evolucionado lentamente a partir de un punto de partida aún más improbable, el

increíblemente más ordenado y asombroso punto de partida exigido por el *big bang}*[6.19]

Pese a todo, cuando seguimos con las apuestas e imaginamos que todo nació por un golpe de azar estadístico, nos encontramos en un atolladero: esa ruta apela a las propias leyes de la física. Y por eso estamos inclinados a no hacer caso de los corredores de apuestas y seguir con un *big bang* de baja entropía como explicación para la flecha del tiempo. El rompecabezas entonces consiste en explicar cómo empezó el universo en una configuración tan improbable y altamente ordenada. Ésa es la cuestión a la que apunta la flecha del tiempo. Todo se reduce a cosmología.[6.20]

Abordaremos una discusión detallada de la cosmología en los capítulos 8 a 11, pero notemos primero que nuestra discusión del tiempo adolece de un serio inconveniente: todo lo que hemos dicho ha estado basado puramente en la física clásica. Consideremos ahora cómo afecta la mecánica cuántica a nuestra comprensión del tiempo y nuestra búsqueda de su flecha.

— 7 —

7. El tiempo y lo cuántico

Ideas sobre la naturaleza del tiempo procedentes del dominio cuántico

Cuando pensamos en algo como el tiempo, algo dentro de lo que estamos, algo que está plenamente integrado en nuestra existencia cotidiana, algo que es tan penetrante, es imposible separarse —siquiera momentáneamente— del lenguaje común; nuestro razonamiento está conformado por nuestras experiencias. Estas experiencias cotidianas son experiencias clásicas; se ajustan con gran exactitud a las leyes de la física formuladas por Newton hace más de trescientos años. Pero de todos los descubrimientos de la física durante los últimos cien años, la mecánica cuántica es con mucho el más extraordinario, puesto que socava todo el esquema conceptual de la física clásica.

Por eso vale la pena ampliar nuestras experiencias clásicas y considerar algunos experimentos que revelan aspectos asombrosos de la evolución de los procesos cuánticos en el tiempo. En este contexto ampliado, continuaremos la discusión del último capítulo y preguntaremos si existe una flecha temporal en la descripción mecanocuántica de la Naturaleza. Llegaremos a una respuesta, aunque sea una respuesta que todavía

despierta controversia incluso entre los físicos. Y una vez más nos devolverá al origen del universo.

El pasado según lo cuántico

La probabilidad desempeñó un papel crucial en el último capítulo, pero, como subrayé en un par de ocasiones, aparecía solamente debido a su conveniencia práctica y a la utilidad de la información que proporciona. Seguir el movimiento exacto de las 10^{24} moléculas de H_2O en un vaso del agua está mucho más allá de nuestra capacidad de computación, e incluso si fuera posible, ¿qué haríamos con la montaña de datos resultante? Determinar a partir de una lista de 10^{24} posiciones y velocidades si había cubos de hielo en el vaso sería una tarea hercúlea. Por eso nos volvemos al razonamiento probabilista, que es tratable computacionalmente y, además, trabaja con propiedades macroscópicas —orden *versus* desorden; por ejemplo, hielo *versus* agua— en las que generalmente estamos interesados. Pero tengamos presente que la probabilidad no está en modo alguno cosida de una manera fundamental en el tejido de la física clásica. Ésta nos dice que si conociéramos exactamente cómo eran las cosas ahora —si conociéramos las posiciones y velocidades de cada una de las partículas que constituyen el universo— podríamos, en principio, utilizar dicha información para predecir cómo serán las cosas en cualquier instante dado en el futuro o cómo fueron en cualquier instante dado en el pasado. Ya siga o no realmente su desarrollo momento a momento según la física clásica, usted puede hablar sobre el pasado y sobre el futuro, en principio, con una confianza que depende del detalle y la precisión de sus observaciones del presente. **[7.1]**

La probabilidad desempeñará un papel central también en este capítulo. Pero puesto que la probabilidad es un elemento inevitable de la mecánica cuántica, altera fundamentalmente nuestra conceptualización del pasado y el futuro. Ya hemos visto que la incertidumbre cuántica impide el conocimiento simultáneo de posiciones exactas y velocidades exactas. En consecuencia, también hemos visto que la física cuántica sólo predice la probabilidad de que se realice uno u otro futuro. Tenemos confianza en estas probabilidades, por supuesto, pero puesto que son probabilidades aprendemos que hay un *inevitable* elemento de azar cuando se trata de predecir el futuro.

Existe también una diferencia crítica entre la física clásica y la cuántica cuando se trata de describir el pasado. En física clásica, de acuerdo con su tratamiento igualitario de todos los instantes de tiempo, los sucesos que conducen a algo que observamos se describen utilizando exactamente el mismo lenguaje y empleando exactamente los mismos atributos que utilizamos para describir la propia observación. Si vemos un meteoro brillante en el cielo nocturno, hablamos de su posición y velocidad; si reconstruimos cómo llegó allí, hablamos de una única sucesión de posiciones y velocidades mientras el meteoro cruzaba el espacio en dirección a la Tierra. En física cuántica, sin embargo, una vez que hemos observado algo entramos en el reino enrarecido en el que conocemos algo con 100 por 100 de certeza (ignorando cuestiones asociadas con la precisión de nuestros aparatos y cosas de este tipo). Pero el pasado —por lo que entendemos específicamente el pasado «inobservado», el tiempo anterior a que nosotros, o cualquiera, o algo, haya realizado una observación dada— permanece en el reino habitual de la incertidumbre cuántica, de las probabilidades. Incluso si medimos la posición de un electrón y encontramos que está

aquí precisamente ahora, todo lo que tenía hace un momento eran probabilidades de estar aquí, o allí, o más allá.

Y como hemos visto, no es que el electrón (o cualquier partícula, para el caso) estuviera realmente localizado en una sola de estas posiciones posibles, y que simplemente no sabíamos en cuál.[7.2] Más bien, en cierto sentido el electrón estaba en todos los lugares, porque cada una de las posibilidades —cada una de las historias posibles— contribuye a lo que observamos ahora. Recordemos que vimos pruebas de esto en el experimento, descrito en el capítulo 4, en el que los electrones eran obligados a atravesar dos rendijas. La física clásica, que descansa en la creencia comúnmente aceptada de que los sucesos tienen historias únicas y convencionales, diría que cualquier electrón que llega a la pantalla detectora atravesó o bien la rendija izquierda o bien la rendija derecha. Pero esta visión del pasado nos llevaría por un camino equivocado: prediría los resultados ilustrados en la figura 4.3a, que no coinciden con lo que realmente sucede, como se ilustra en la figura 4.3b. La figura de interferencia observada puede explicarse solamente apelando a un solapamiento entre algo que pasa a través de *ambas* rendijas.

La física cuántica proporciona precisamente tal explicación, pero al hacerlo cambia drásticamente nuestras historias del pasado —nuestras descripciones de cómo llegaron a ser las cosas concretas que observamos—. Según la mecánica cuántica, la onda de probabilidad de cada electrón atraviesa ambas rendijas, y cuando se juntan las partes de la onda que emergen de cada rendija el perfil de probabilidad resultante manifiesta una figura de interferencia, y con ello también lo hacen las posiciones de llegada del electrón.

Comparada con la experiencia cotidiana, esta descripción del pasado del electrón en términos de ondas de probabilidad que se entrecruzan es muy poco familiar. Pero, olvidando cualquier precaución, usted podría sugerir que llevemos esta descripción mecanocuántica un paso más allá, lo que conduce a una posibilidad que suena aún más extraña. Quizá cada electrón individual atraviesa realmente ambas rendijas en su camino hacia la pantalla, y los datos son resultados de una interferencia entre estas dos clases de historias. Es decir, es tentador pensar que las ondas que emergen de las dos rendijas representan dos historias posibles para un electrón individual —atravesando la rendija izquierda o atravesando la rendija derecha— y puesto que ambas ondas contribuyen a lo que observamos en la pantalla, quizá la mecánica cuántica nos está diciendo que ambas historias potenciales del electrón también contribuyen.

Sorprendentemente, esta idea extraña y maravillosa —hija del premio Nobel Richard Feynman, uno de los físicos más creativos del siglo xx— ofrece una manera perfectamente viable de pensar en mecánica cuántica. Según Feynman, si hay formas alternativas de alcanzar un resultado dado —por ejemplo, un electrón incide en un punto de la pantalla detectora atravesando la rendija izquierda, o incide en el mismo punto de la pantalla pero atravesando la rendija derecha— entonces hay un sentido en el que todas las historias alternativas suceden, y suceden simultáneamente. Feynman demostró que cada una de estas historias contribuiría a la probabilidad de que se realizase su resultado común, y si estas contribuciones fueran sumadas correctamente, el resultado coincidiría con la probabilidad total predicha por la mecánica cuántica.

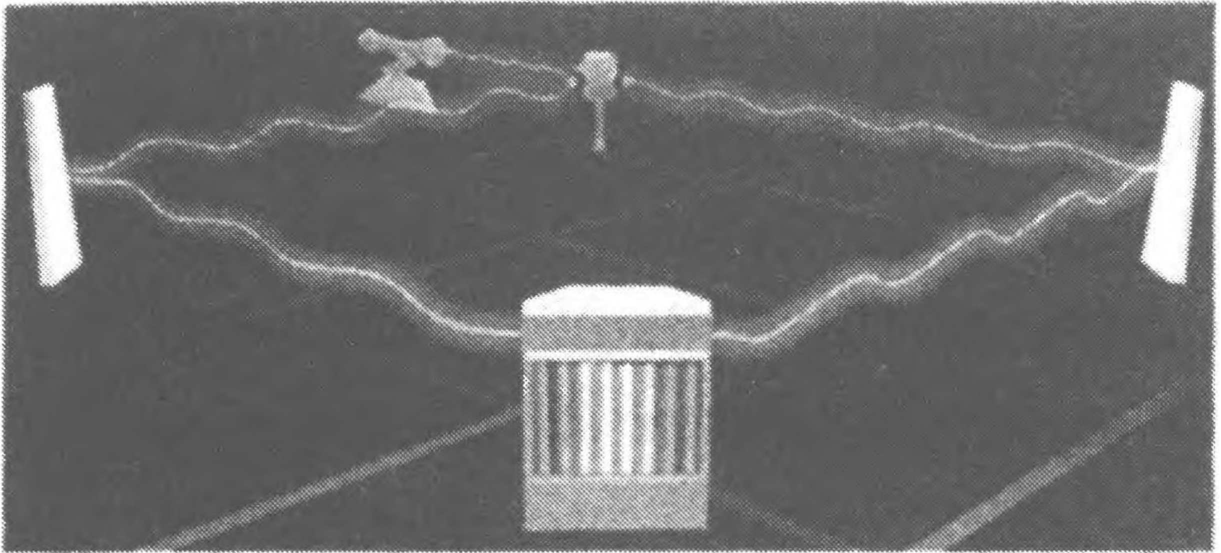
Feynman llamó a esto la aproximación de *suma sobre historias* a la mecánica cuántica; muestra que una onda de

probabilidad incorpora todos los pasados posibles que podrían haber precedido a una observación dada, e ilustra bien que para tener éxito donde la física clásica fallaba, la mecánica cuántica tenía que ampliar sustancialmente el marco de la historia.[7.3]

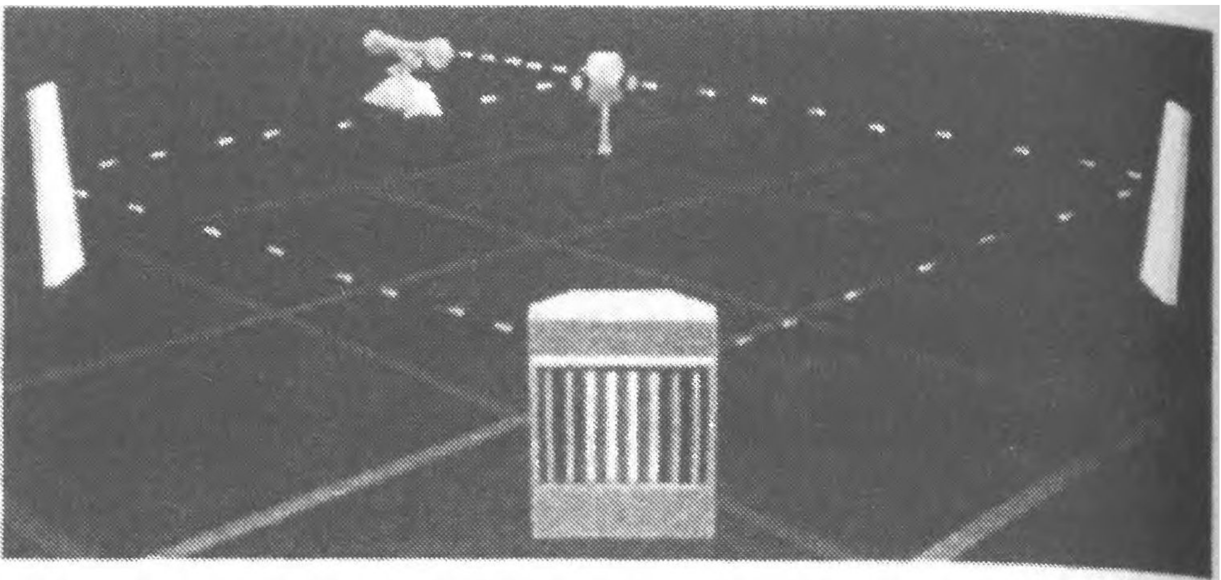
Hacia Oz

Hay una variante del experimento de la doble rendija en el que la interferencia entre historias alternativas se hace aún más evidente porque las dos rutas hacia la pantalla detectora están más ampliamente separadas. Es un poco más fácil describir el experimento utilizando fotones en lugar de electrones, de modo que empezamos con una fuente de fotones —un láser— y la disparamos hacia lo que se conoce como un *divisor de haz.* Este dispositivo está construido a partir de un espejo semiplateado, del tipo utilizado para vigilancia, que refleja la mitad de la luz que incide sobre él mientras permite que pase la otra mitad. El haz de luz inicial es así dividido en dos, el haz izquierdo y el haz derecho, de forma similar a lo que le sucede a un haz de luz que incide sobre las dos rendijas en el montaje de la doble rendija. Utilizando espejos completamente reflectantes colocados adecuadamente, como en la figura 7.1, los dos haces son reunidos de nuevo aguas abajo en la localización del detector. Si tratamos la luz como una onda, como en la descripción de Maxwell, esperamos —y, de hecho encontramos— una figura de interferencia en la pantalla. La longitud del trayecto hasta un punto cualquiera de la pantalla, salvo el punto central, es ligeramente diferente para las rutas izquierda y derecha y, por ello, cuando la onda del haz izquierdo esté alcanzando una cresta en un punto dado de la pantalla detectora, la onda

del haz derecho puede estar alcanzando una cresta, un vientre, o algo intermedio. El detector registra la altura combinada de las dos ondas y por ello obtiene la figura de interferencia característica.



(a)



(b)

FIGURA 7.1. **(a)** En un experimento con divisor de haz, la luz del láser se desdobla en dos haces que recorren dos caminos independientes hasta la pantalla detectora. (b) La intensidad del láser puede reducirse de modo que lance fotones individuales; con el tiempo, las posiciones de impacto de los fotones formarán una figura de interferencia.

La distinción clásico-cuántico se hace evidente cuando disminuimos drásticamente la intensidad del láser de modo que emita fotones de uno en uno, por ejemplo, uno cada pocos segundos. Cuando un único fotón incide en el divisor de haz, la intuición clásica dice que o bien pasará o bien será reflejado. El razonamiento clásico ni siquiera permite un indicio de ningún tipo de interferencia, puesto que no hay nada para interferir: todo lo que tenemos son fotones únicos, individuales y concretos que pasan de la fuente al detector, de uno en uno, algunos yendo por la izquierda, otros yendo por la derecha. Pero cuando se hace el experimento, los fotones individuales registrados a lo largo del tiempo, como en la figura 4.4, dan una figura de interferencia, como en la figura 7.1b. Según la física cuántica, la razón es que cada fotón detectado *podría* haber llegado al detector por la ruta izquierda o por la ruta derecha. Así pues, estamos obligados a combinar estas dos historias posibles al determinar la probabilidad de que un fotón incida en la pantalla en un punto concreto u otro. Cuando las ondas de probabilidad izquierda y derecha para cada fotón individual se funden de esta manera, dan la figura de probabilidad ondulante de la interferencia entre ondas. Y así, a diferencia de Dorita, que queda asombrada cuando el Espantapájaros señala tanto a izquierda como a derecha para indicarle las direcciones a Oz, los datos pueden ser explicados perfectamente imaginando que cada fotón toma los dos caminos, izquierdo y derecho, hacia el detector.

Pro elección

Aunque hemos descrito la fusión de historias posibles en el contexto de sólo un par de ejemplos concretos, esta manera

de pensar en mecánica cuántica es general. Mientras que la física clásica describe el presente como poseedor de un único pasado, las ondas de probabilidad de la mecánica cuántica amplían el escenario de la historia: en la formulación de Feynman el presente observado representa una amalgama —un tipo concreto de *promedio*— de todos los pasados posibles compatibles con lo que vemos ahora.

En el caso de los experimentos de la doble rendija y del divisor de haz, hay dos modos de que un electrón o un fotón vaya de la fuente a la pantalla detectora —por la izquierda o por la derecha— y sólo combinando las historias posibles obtenemos una explicación para lo que observamos. Si la barrera tuviera tres rendijas, habríamos tenido que tomar en cuenta los tres tipos de historias; con trescientas rendijas, tendríamos que incluir las contribuciones de la totalidad de historias posibles. Llevando esto al límite, si imaginamos un número enorme de rendijas —tantas, de hecho, que la barrera desaparece prácticamente— la física cuántica dice que cada electrón atravesaría cada camino posible en su ruta hacia un punto concreto de la pantalla, y sólo al combinar las probabilidades asociadas con cada una de estas historias podríamos explicar los datos resultantes. Eso puede sonar extraño. (Es extraño.) Pero este tratamiento extraño de los tiempos pasados explica los datos de la figura 4.4, la figura 7.1b y cualquier otro experimento que trata con el micromundo.

Quizá usted se pregunta con qué literalidad debería tomar la descripción de suma sobre historias. ¿Realmente un electrón que incide en la pantalla detectora llega allí viajando a lo largo de todos los caminos posibles, o es la receta de Feynman un mero artificio matemático astuto que da la respuesta correcta? Esta es una de las preguntas clave para valorar la verdadera naturaleza del reino cuántico, así que me gustaría poder darle una respuesta definitiva. Pero

no puedo hacerlo. A menudo los físicos encuentran extraordinariamente útil imaginar un enorme conjunto de historias que se combinan; yo mismo utilizo esta imagen en mi investigación con tanta frecuencia que ciertamente parece real. Pero eso no es lo mismo que decir que es real. El punto importante es que los cálculos cuánticos nos dan inequívocamente la probabilidad de que un electrón llegue a un punto u otro de la pantalla, y estas predicciones coinciden con los datos. Por lo que respecta a la verificación de la teoría y la utilidad predictiva, la historia que contemos de cómo llegó el electrón a ese punto de la pantalla tiene poca relevancia.

Pero, seguirá usted diciendo, seguro que podemos dirimir la cuestión de lo que sucede realmente si cambiamos el montaje experimental de modo que también podamos observar la pretendida mezcla borrosa de caminos posibles que se fusionan en el presente observado. Es una buena sugerencia, pero ya sabemos que tiene que haber un pero. En el capítulo 4 aprendimos que las ondas de probabilidad no son directamente observables; puesto que las historias coalescentes de Feynman no son otra cosa que una forma concreta de pensar en ondas de probabilidad, también ellas deben evitar la observación directa. Y lo hacen. Las observaciones no pueden separar historias individuales; más bien, las observaciones reflejan promedios de todas las historias posibles. Así, si usted cambia el montaje y coloca un detector para observar los electrones en vuelo, verá que cada electrón pasa por su detector adicional en una posición u otra; nunca verá historias múltiples borrosas. Cuando utilice la mecánica cuántica para explicar por qué vio el electrón en un lugar u otro, la respuesta implicará promediar sobre todas las historias posibles que podrían haber llevado a esa observación intermedia. Pero la observación sólo tiene acceso a historias que ya se han

fusionado. Al mirar el electrón en vuelo, usted simplemente ha hecho retroceder la idea de lo que entiende por una historia. La mecánica cuántica es lacónicamente eficiente: explica lo que usted ve pero le impide ver la explicación.

Usted podría seguir preguntando: ¿por qué, entonces, la física clásica —la física del sentido común— que describe el movimiento en términos de historias únicas es absolutamente relevante para el universo? ¿Por qué funciona también para explicar y predecir el movimiento de cualquier cosa, desde pelotas de béisbol a planetas o cometas? ¿Cómo no hay evidencia en la vida cotidiana de la extraña manera en que el pasado se despliega aparentemente en el presente? La razón, discutida brevemente en el capítulo 4 y que pronto será desarrollada con más precisión, es que pelotas de béisbol, planetas y cometas son relativamente grandes, al menos cuando se comparan con partículas como los electrones. Y en mecánica cuántica, cuanto más grande es algo, más puntiagudo se hace el promedio: todas las trayectorias posibles contribuyen al movimiento de una bola de béisbol en vuelo, pero la contribución del camino normal —el único camino predicho por las leyes de Newton— es mucho mayor que la de todos los demás caminos combinados. En el caso de objetos grandes sucede que los caminos clásicos son, con mucho, la contribución dominante al hacer el promedio y por ello son los que nos resultan familiares. Pero cuando los objetos son pequeños, como los electrones, quarks y fotones, muchas historias diferentes contribuyen aproximadamente al mismo nivel y por ello todas tienen papeles importantes al hacer la media.

Usted podría preguntar finalmente ¿qué hay tan especial en el acto de observar o medir que puede obligar a que todas las historias posibles se fusionen y den un único resultado? ¿Cómo le dice nuestro acto de observar a una

partícula que es el momento de reunir las historias, promediarlas y llegar a un resultado definido? ¿Por qué nosotros los seres humanos, y los aparatos que construimos, tenemos este poder especial? ¿Realmente es especial? ¿O quizá el acto humano de observación es parte de un marco más amplio de influencia ambiental que muestra, mecanocuánticamente hablando, que no somos tan especiales después de todo? Abordaremos estas preguntas desconcertantes y controvertidas en la segunda mitad de este capítulo, pues no sólo son centrales para la naturaleza de la realidad cuántica sino que ofrecen un marco importante para pensar la mecánica cuántica y la flecha del tiempo.

Calcular promedios mecanocuánticos requiere un importante entrenamiento técnico. Y entender plenamente cómo, cuándo y dónde realizar los promedios requiere conceptos que los físicos aún se esfuerzan en formular. Pero una lección clave puede enunciarse de forma simple: la mecánica cuántica es el escenario proelección final: cada posible «elección» que algo pudiera hacer al ir de aquí a allí está incluida en la probabilidad mecanocuántica asociada con un resultado posible u otro.

lizo esta imagen en mi investigación con tanta frecuencia que ciertamente parece real. Pero eso no es lo mismo que decir que es real. El punto importante es que los cálculos cuánticos nos dan inequívocamente la probabilidad de que un electrón llegue a un punto u otro de la pantalla, y estas predicciones coinciden con los datos. Por lo que respecta a la verificación de la teoría y la utilidad predictiva, la historia que contemos de cómo llegó el electrón a ese punto de la pantalla tiene poca relevancia.

Pero, seguirá usted diciendo, seguro que podemos dirimir la cuestión de lo que sucede realmente si cambiamos el montaje experimental de modo que también podamos

observar la pretendida mezcla borrosa de caminos posibles que se fusionan en el presente observado. Es una buena sugerencia, pero ya sabemos que tiene que haber un pero. En el capítulo 4 aprendimos que las ondas de probabilidad no son directamente observables; puesto que las historias coalescentes de Feynman no son otra cosa que una forma concreta de pensar en ondas de probabilidad, también ellas deben evitar la observación directa. Y lo hacen. Las observaciones no pueden separar historias individuales; más bien, las observaciones reflejan promedios de todas las historias posibles. Así, si usted cambia el montaje y coloca un detector para observar los electrones en vuelo, verá que cada electrón pasa por su detector adicional en una posición u otra; nunca verá historias múltiples borrosas. Cuando utilice la mecánica cuántica para explicar por qué vio el electrón en un lugar u otro, la respuesta implicará promediar sobre todas las historias posibles que podrían haber llevado a esa observación intermedia. Pero la observación sólo tiene acceso a historias que ya se han fusionado. Al mirar el electrón en vuelo, usted simplemente ha hecho retroceder la idea de lo que entiende por una historia. La mecánica cuántica es lacónicamente eficiente: explica lo que usted ve pero le impide ver la explicación.

Usted podría seguir preguntando: ¿por qué, entonces, la física clásica —la física del sentido común— que describe el movimiento en términos de historias únicas es absolutamente relevante para el universo? ¿Por qué funciona también para explicar y predecir el movimiento de cualquier cosa, desde pelotas de béisbol a planetas o cometas? ¿Cómo no hay evidencia en la vida cotidiana de la extraña manera en que el pasado se despliega aparentemente en el presente? La razón, discutida brevemente en el capítulo 4 y que pronto será desarrollada con más precisión, es que pelotas de béisbol, planetas y

cometas son relativamente grandes, al menos cuando se comparan con partículas como los electrones. Y en mecánica cuántica, cuanto más grande es algo, más puntiagudo se hace el promedio: todas las trayectorias posibles contribuyen al movimiento de una bola de béisbol en vuelo, pero la contribución del camino normal —el único camino predicho por las leyes de Newton— es mucho mayor que la de todos los demás caminos combinados. En el caso de objetos grandes sucede que los caminos clásicos son, con mucho, la contribución dominante al hacer el promedio y por ello son los que nos resultan familiares. Pero cuando los objetos son pequeños, como los electrones, quarks y fotones, muchas historias diferentes contribuyen aproximadamente al mismo nivel y por ello todas tienen papeles importantes al hacer la media.

Usted podría preguntar finalmente ¿qué hay tan especial en el acto de observar o medir que puede obligar a que todas las historias posibles se fusionen y den un único resultado? ¿Cómo le dice nuestro acto de observar a una partícula que es el momento de reunir las historias, promediarlas y llegar a un resultado definido? ¿Por qué nosotros los seres humanos, y los aparatos que construimos, tenemos este poder especial? ¿Realmente es especial? ¿O quizá el acto humano de observación es parte de un marco más amplio de influencia ambiental que muestra, mecanocuánticamente hablando, que no somos tan especiales después de todo? Abordaremos estas preguntas desconcertantes y controvertidas en la segunda mitad de este capítulo, pues no sólo son centrales para la naturaleza de la realidad cuántica sino que ofrecen un marco importante para pensar la mecánica cuántica y la flecha del tiempo.

Calcular promedios mecanocuánticos requiere un importante entrenamiento técnico. Y entender plenamente

cómo, cuándo y dónde realizar los promedios requiere conceptos que los físicos aún se esfuerzan en formular. Pero una lección clave puede enunciarse de forma simple: la mecánica cuántica es el escenario proelección final: cada posible «elección» que algo pudiera hacer al ir de aquí a allí está incluida en la probabilidad mecanocuántica asociada con un resultado posible u otro.

La física clásica y la física cuántica tratan el pasado de formas muy diferentes.

Podando la historia

Es totalmente incompatible con nuestra educación clásica imaginar un objeto indivisible —un electrón o un fotón— moviéndose simultáneamente a lo largo de más de un camino. Incluso aquellos de nosotros con el máximo autocontrol tendríamos dificultades para resistimos a la tentación de fisgar: cuando el electrón o el fotón atraviesa la pantalla con doble rendija o el divisor de haz, ¿por qué no echar una mirada rápida para ver qué camino sigue *realmente* en su viaje hacia el detector? En el experimento de la doble rendija, ¿por qué no colocar pequeños detectores delante de cada rendija que nos digan si el electrón atravesó una abertura, la otra o ambas (aunque permitiendo que el electrón siga hacia el detector principal)? En el experimento del divisor de haz, ¿por qué no colocar en cada camino que sale del divisor de haz, un pequeño detector que diga si el electrón tomó la ruta izquierda, la ruta derecha o ambas rutas (aunque permitiendo, una vez más, que el fotón siga adelante hacia el detector)?

La respuesta es que usted *puede* insertar estos detectores adicionales, pero si lo hace encontrará dos

cosas: primero, cada electrón y cada fotón serán encontrados siempre atravesando uno y sólo uno de los detectores; es decir, usted puede determinar qué camino sigue cada electrón o cada fotón, y encontrará que siempre va por un camino u otro, y no por ambos. En segundo lugar, usted encontrará también que los datos resultantes registrados por los detectores principales han cambiado. En lugar de obtener las figuras de interferencia de la figura 4.3b y 7.1b, usted obtiene los resultados esperados a partir de la física clásica, como en la figura 4.3a. Al introducir nuevos elementos—los nuevos detectores— usted ha cambiado sin querer los experimentos. Y el cambio es tal que la paradoja que estaba a punto de resolver —que usted sabe ahora qué camino tomó cada partícula, de modo que ¿cómo podría haber interferencia con otro camino que la partícula patentemente no tomó?— queda eliminada. La razón se sigue inmedia

tamente de la última sección. Su nueva observación separa aquellas historias que podrían haber precedido a cualquier cosa que revelara su nueva observación. Y puesto que esta observación determinaba qué trayectoria tomó el fotón, *sólo consideramos aquellas historias que recorren este camino, eliminando así la posibilidad de interferencia.*

A Niels Bohr le gustaba resumir estas cosas utilizando su *principio de complementariedad.* Cada electrón, cada fotón, cada cosa, de hecho, tiene al mismo tiempo aspectos tipo onda y tipo partícula. Son características complementarias. Pensar puramente en el marco de partícula convencional —en el que las partículas se mueven a lo largo de trayectorias únicas— es incompleto, porque pasa por alto los aspectos tipo onda puestos de manifiesto por las figuras de interferencia.[*16] Pensar puramente en el marco tipo onda es incompleto, porque pasa por alto los aspectos tipo partícula puestos de manifiesto por medidas que

encuentran partículas localizadas que pueden ser registradas, por ejemplo, por un único punto en una pantalla. (Ver figura 4.4.) Una imagen completa requiere que ambos aspectos complementarios sean tenidos en cuenta. En cualquier situación dada usted puede obligar a que una característica sea más prominente en virtud de cómo decida usted interaccionar. Si permite que los electrones viajen de la fuente a la pantalla sin ser observados, pueden emerger sus cualidades tipo onda, dando interferencia. Pero si observa al electrón en ruta, usted sabe qué camino tomó, de modo que no podría explicar la interferencia. La realidad viene al rescate. Su acto de observación poda las ramas de la historia cuántica. Obliga al electrón a comportarse como una partícula; puesto que las partículas siguen un camino o el otro, no se forma ninguna figura de interferencia, de modo que no hay nada que explicar.

La Naturaleza hace cosas extrañas. Vive en el límite. Pero es cuidadosa y se detiene ante el golpe fatal de la paradoja lógica.

La contingencia de la historia

Estos experimentos son notables. Proporcionan una prueba simple pero poderosa de que nuestro mundo está gobernado por las leyes cuánticas descubiertas por los físicos en el siglo xx, y no por las leyes clásicas descubiertas por Newton, Maxwell y Einstein —leyes que ahora reconocemos como aproximaciones intuitivas y poderosas para describir sucesos a escalas suficientemente grandes—. Ya hemos visto que las leyes cuánticas desafían las leyes convencionales de lo que sucedió en el pasado —esos sucesos inobservados que son responsables de lo que

vemos ahora—. Algunas variantes simples de estos experimentos plantean este desafío a nuestra noción intuitiva de cómo se despliegan las cosas en el tiempo en un nivel aún mayor y aún más sorprendente.

La primera variante se denomina el experimento de la *elección diferida* y fue sugerido en 1980 por el eminente físico John Wheeler. El experimento se enfrenta a una pregunta extraña: ¿depende el pasado del futuro? Note que esto no es lo mismo que preguntar si podemos volver y cambiar el pasado (un tema que abordaremos en el capítulo 15). En lugar de ello, el experimento de Wheeler, que ha sido realizado y analizado con considerable detalle, expone una provocativa interrelación entre sucesos que imaginamos que tienen lugar en el pasado, incluso el pasado distante, y los que vemos que tienen lugar precisamente ahora.

Para hacerse una idea de la física, imagine que usted es un coleccionista de arte y el Sr. Smithers, presidente de la nueva Sociedad de Arte y Embellecimiento de Springfield, va a examinar varias obras que usted ha puesto en venta. Usted sabe, sin embargo, que lo que realmente le interesa al Sr. Smithers es *The Full Monty,* un cuadro que a usted nunca le gustó mucho pero que heredó de su muy amado tío abuelo Monty Bums, de modo que decidir si lo vende o no supone para usted una lucha emocional. Cuando llega el Sr. Smithers, usted habla de su colección, de las subastas recientes, del espectáculo actual en el Metropolitan; para su sorpresa, se entera de que, años atrás, Smithers fue un gran ayudante de su tío abuelo. Al final de la conversación usted decide que está dispuesto a deshacerse de *The Full Monty.* son muchas las obras que a usted le gustan y debe moderarse o su colección no tendrá un centro definido. En el mundo del coleccionismo de arte, se ha dicho usted siempre a sí mismo, a veces más es menos.

Cuando usted reconsidera esta decisión parece, visto en retrospectiva, que usted ya había decidido vender antes de que llegara el Sr. Smithers. Aunque siempre ha tenido cierta estima por *The Full Monty,* siempre se ha cuidado de acumular una extensa colección y el realismo erótico-nuclear de finales del siglo xx es un área que intimida a cualquier coleccionista salvo los más avezados. Incluso si usted recuerda que antes de la llegada de su visitante había estado pensando en que no sabía qué hacer, desde su punto de vista actual parece como si realmente lo supiera. No es exactamente que los sucesos futuros hayan afectado al pasado, pero su agradable encuentro con el Sr. Smithers y su declaración posterior de su disposición a vender han iluminado el pasado de una forma que hace definidas cosas concretas que entonces parecían no decididas. Es como si el encuentro y su declaración le ayudaran a aceptar una decisión que ya estaba tomada, una decisión que estaba esperando a ser sacada a la luz. El futuro le ha ayudado a contar una historia más completa de lo que estaba sucediendo en el pasado.

Por supuesto, en este ejemplo los sucesos futuros están afectando sólo a su percepción o interpretación del pasado, de modo que los sucesos no son ni enigmáticos ni sorprendentes. Pero el experimento de elección diferida de Wheeler traslada esta interrelación psicológica entre el futuro y el pasado al reino cuántico, donde se hace a la vez precisa y sorprendente. Empezamos con el experimento de la figura 7.1a, modificado de modo que el láser emite fotones de uno en uno, como en la figura 7. Ib, y añadiendo también un nuevo detector de fotones próximo al divisor de haz. Si el nuevo detector está desconectado (ver figura 7.2b), entonces volvemos al montaje experimental original y los fotones generan una figura de interferencia en la pantalla fotográfica. Pero si se conecta el nuevo detector

(figura 7.2a), éste nos dice qué camino siguió cada fotón: si detecta un fotón, entonces el fotón tomó ese camino; si no detecta un fotón, entonces el fotón tomó el otro camino. Esta información «qué-camino», como se la llama, obliga al fotón a actuar como una partícula, de modo que ya no se genera la figura de interferencia tipo onda.

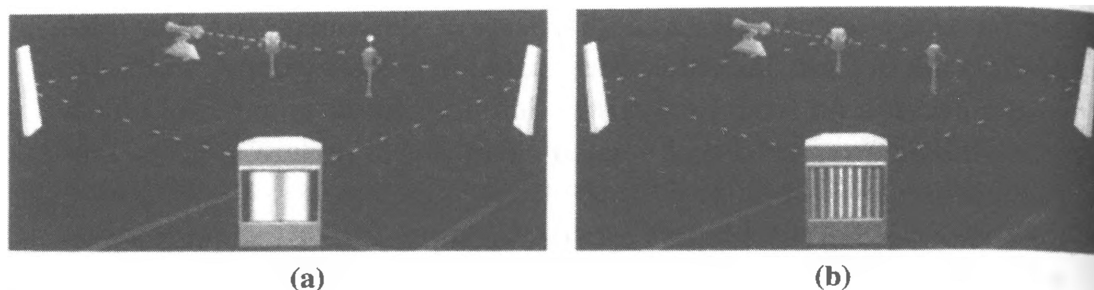


FIGURA 7.2. **(a)** Conectando detectores «qué-camino», destruimos la figura de interferencia, (b) Cuando se desconectan los nuevos detectores, volvemos a la situación de la figura 7.1 y se forma la figura de interferencia.

Cambiemos ahora las cosas, a la Wheeler, moviendo el nuevo detector de fotones y alejándolo aguas abajo a lo largo de uno de los dos caminos. En principio, los caminos pueden ser tan largos como usted quiera, de modo que el nuevo detector puede estar a una distancia considerable del divisor de haz. Una vez más, si se desconecta este nuevo detector de fotones, estamos en la situación habitual y los fotones llenarán una figura de interferencia en la pantalla. Si se conecta, proporciona información qué-camino y con ello impide la existencia de una figura de interferencia.

La nueva rareza procede del hecho de que la medida qué-camino tiene lugar mucho *después* de que el fotón tuviera que «decidir» en el divisor de haz si actuar como una onda y recorrer ambos caminos o actuar como una partícula y recorrer sólo uno. Cuando el fotón está

atravesando el divisor de haz, no puede «saber» si el nuevo detector está conectado o desconectado —en la práctica, el experimento puede montarse de modo que el interruptor que conecta el detector se acciona *después* de que el fotón ha pasado por el divisor—. Para estar preparada para la posibilidad de que el detector esté apagado, la onda cuántica del fotón tendría que haberse desdoblado y recorrer ambos caminos, de modo que una amalgama de los dos pueda producir la figura de interferencia observada. Pero si el nuevo detector estuviera

conectado —o si fue conectado después de que el fotón atravesara el divisor— parecería presentar al fotón una crisis de identidad: al atravesar el divisor ya se habría comprometido con su carácter tipo onda recorriendo ambos caminos, pero ahora, algún tiempo después de tomar esta decisión, «se da cuenta» de que necesita volver a ser una partícula que recorre uno y sólo un camino.

De algún modo, sin embargo, los fotones siempre hacen lo correcto. Cuando quiera que el detector está conectado —una vez más, incluso si la decisión de conectarlo se retrasa hasta mucho tiempo después de que un fotón dado haya atravesado el divisor de haz— el fotón actúa completamente como una partícula. Se encuentra que está en una y sólo una ruta hacia la pantalla (si colocáramos detectores de fotones aguas abajo a lo largo de ambas rutas, cada fotón emitido por el láser sería detectado por uno u otro detector, nunca por los dos); los datos resultantes no muestran ninguna figura de interferencia. Cuando quiera que el nuevo detector está desconectado —de nuevo, incluso si esta decisión se hace después de que cada fotón ha pasado por el divisor— los fotones actúan completamente como una onda, dando la famosa figura de interferencia que muestra que han recorrido ambos caminos. Es como si los fotones ajustaran su

comportamiento en el pasado de acuerdo con la elección futura de si el nuevo detector está conectado o no; es como si los fotones tuvieran una «premonición» de la situación experimental que encontrarán aguas abajo, y actuaran en consecuencia. Es como si una historia consistente y definida se hiciera manifiesta sólo después de que el futuro al que conduce ha sido plenamente establecido.[7.4]

Hay una analogía con su experiencia de decidir vender *The Full Monty.* Antes del encuentro con el Sr. Smithers, usted estaba en un estado ambiguo, indeciso, borroso y mezclado entre estar a la vez dispuesto y no dispuesto a vender el cuadro. Pero al hablar los dos del mundo del arte y saber el afecto de Smithers por su tío abuelo usted se sintió cada vez más cómodo con la idea de vender. La conversación le llevó a una decisión firme, que a su vez permitió que una historia de la decisión cristalizara a partir de la incertidumbre previa. Visto en retrospectiva, se siente como si la decisión hubiese estado realmente tomada desde el principio. Pero si usted no hubiese hecho tan buenas

migas con el Sr. Smithers, si él no le hubiera confiado que *The Full Monty* estaría en manos dignas de confianza, usted muy bien podría haber decido no vender. Y la historia del pasado que pudiera contar en esta situación podría incluir fácilmente un reconocimiento de que usted había decidido no vender hacía mucho tiempo —que no importa cuán razonable pudiera ser vender el cuadro, usted siempre ha sabido en lo más íntimo que la conexión sentimental era demasiado fuerte para dejarlo escapar—. El pasado real, por supuesto, no cambió un ápice. Pero una experiencia diferente le llevaría ahora a describir una historia diferente.

En el escenario psicológico reescribir o reinterpretar el pasado es un lugar común; nuestra historia del pasado suele estar informada por nuestras experiencias en el presente. Pero en el escenario de la física —un escenario

que normalmente consideramos objetivo y grabado en piedra— una contingencia futura de la historia hace que uno vuelva la cabeza. Para hacer el giro aún más serio, Wheeler imagina una versión cósmica del experimento de la *elección diferida* en la que la fuente luminosa no es un láser de laboratorio sino, en su lugar, un potente cuá- sar en el espacio profundo. El divisor de haz tampoco es un aparato de laboratorio, sino una galaxia interpuesta cuya atracción gravitatoria puede actuar como una lente que concentra los fotones que pasan y los dirige hacia la Tierra, como en la figura 7.3. Aunque nadie ha realizado todavía el experimento, si se recogieran suficientes fotones procedentes del cuásar deberían formar, en teoría, una figura de interferencia en una placa fotográfica sometida a una exposición prolongada, igual que en el experimento del divisor de haz. Pero si colocáramos otro detector de fotones precisamente cerca del final de una ruta o la otra, proporcionaría información qué-camino sobre los fotones, destruyendo con ello la figura de interferencia.

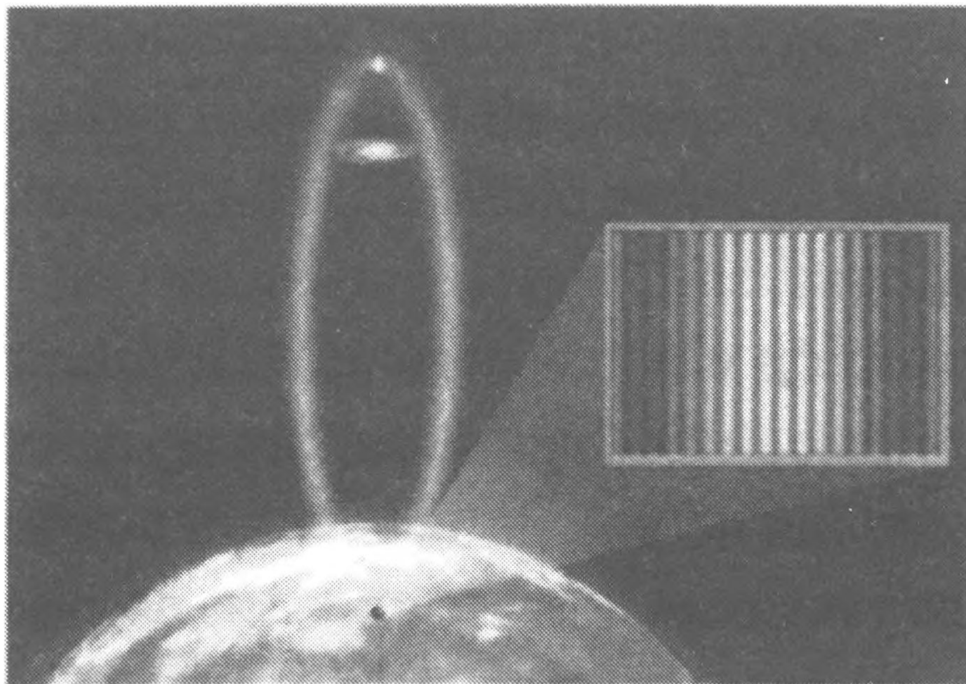


FIGURA 7.3. La luz procedente de un cuásar distante, desdoblada y concentrada por una galaxia interpuesta, dará, en principio, una figura de interferencia. Si se conectara un detector adicional que permite la determinación del camino seguido por cada fotón, los fotones siguientes ya no formarían una figura de interferencia.

Lo que choca en esta versión es que, desde nuestra perspectiva, los fotones podrían haber estado viajando durante muchos miles de millones de años. Su decisión para seguir un camino en la galaxia, como una partícula, o ambos caminos, como una onda, parecería haberse tomado mucho antes de que existiera el detector, cualquiera de nosotros o incluso la Tierra. Pero, miles de millones de años después, se construyó el detector, se instaló a lo largo de uno de los caminos que los fotones toman para llegar a la Tierra, y se conectó. Y estos actos recientes aseguran de algún modo que los fotones en consideración actúan como partículas. Actúan como si hubieran estado viajando

precisamente a lo largo de un camino u otro en su largo viaje hacia la Tierra. Pero si, al cabo de unos minutos, desconectamos el detector, los fotones que posteriormente alcanzan la placa fotográfica empiezan a formar una figura de interferencia, lo que indica que durante miles de millones de años han estado viajando juntos con sus compañeros fantasmas, siguiendo caminos opuestos en tomo a la galaxia.

¿Ha afectado nuestra conexión o desconexión del detector en el siglo xxi al movimiento de los fotones unos miles de millones de años antes? Ciertamente no. La mecánica cuántica no niega que el pasado haya sucedido, y sucedido plenamente. La tensión surge simplemente porque el concepto de *pasado* según lo cuántico es diferente del concepto de *pasado* según la intuición clásica. Nuestra educación clásica nos hace decir que un fotón dado *hizo* esto o *hizo* aquello. Pero en un mundo cuántico, nuestro mundo, este razonamiento impone al fotón una realidad que es demasiado restrictiva. Como hemos visto, en mecánica cuántica la norma es una realidad híbrida, indeterminada y borrosa que consta de muchas hebras, que sólo cristalizan en una realidad más familiar y definida cuando se realiza una observación adecuada. No es que el fotón decidiera hace miles de millones de años seguir un camino u otro, o ambos, en tomo a la galaxia. Más bien, durante miles de millones de años ha estado en la norma cuántica: un híbrido de posibilidades.

El acto de observación vincula esta realidad cuántica poco familiar con la experiencia clásica cotidiana. Las observaciones que hacemos hoy hacen que una de las hebras de la historia cuántica adquiera prominencia en nuestro recuento del pasado. En este sentido, aunque la evolución cuántica del pasado hasta ahora no es afectada por nada de lo que hacemos ahora, la historia que contamos

del pasado puede llevar la huella de las acciones de hoy. Si insertamos detectores de fotones a lo largo de los dos caminos que toma la luz hacia una pantalla, entonces nuestra historia del pasado incluirá una descripción de qué camino tomó cada fotón; al insertar los detectores de fotones, aseguramos que la información qué-camino es un detalle esencial y definitivo de nuestra historia. Pero si no insertamos los detectores de fotones, nuestra historia del pasado será necesariamente diferente. Sin los detectores de fotones no podemos recontar nada sobre qué camino tomaron los fotones; sin los detectores de fotones, los detalles qué-camino son fundamentalmente inaccesibles. Ambas teorías son válidas. Ambas historias son interesantes. Simplemente describen situaciones diferentes.

Por consiguiente, una observación de hoy puede ayudar a completar la historia que contamos de un proceso que empezó ayer, o anteayer, o quizá mil millones de años antes. Una observación de hoy puede delinear los tipos de detalles que podemos y debemos incluir en el recuento de hoy del pasado.

Borrando el pasado

Es esencial advertir que en estos experimentos el pasado no es en modo alguno alterado por las acciones de hoy, y que ninguna modificación astuta del experimento conseguirá este objetivo resbaladizo. Esto plantea la pregunta: si usted no puede cambiar algo que ya ha sucedido, ¿puede hacer lo más parecido y borrar su *impacto* sobre el pre-

sente? En un grado u otro, a veces esta fantasía puede realizarse. Un jugador de béisbol que, con dos eliminados en la parte final de la novena entrada, deja caer una bola fácil permitiendo que el equipo contrario esté a punto de cerrar

una carrera, puede deshacer el impacto de su error mediante una espectacular captura de la bola golpeada por el siguiente bateador. Y, por supuesto, dicho ejemplo no es nada misterioso. Sólo pensaríamos que había algo raro cuando un suceso en el pasado parece impedir definitivamente que suceda otro suceso en el futuro (como la bola caída impide definitivamente un juego perfecto) y sin embargo nos contaran posteriormente que el suceso impedido había sucedido realmente. El borrador cuántico, sugerido por primera vez en 1982 por Marlan Scully y Kai Drühl, se basa en este tipo de rarezas del mundo cuántico.

Una versión simple del experimento del borrador cuántico hace uso del montaje de la doble rendija, modificado de la siguiente manera. Un dispositivo de etiquetado se coloca delante de cada rendija; marca cualquier fotón que pasa, de modo que cuando el fotón es examinado más tarde usted puede decir por qué rendija pasó. La cuestión de cómo puede usted hacer una marca en un fotón —cómo puede hacer el equivalente a colocar una «I» en un fotón que pasa por la rendija izquierda y una «D» en un fotón que pasa por la rendija derecha— es una buena pregunta, pero los detalles no son particularmente importantes. De manera aproximada, el proceso se basa en utilizar un dispositivo que permite que un fotón pase libremente por una rendija pero obliga a que el eje de su espín apunte en una dirección concreta. Si los dispositivos que hay delante de las rendijas izquierda y derecha manipulan los espines de los fotones de formas específicas pero distintas, entonces una pantalla detectora más refinada, que no sólo registra el lugar de impacto del fotón sino que también mantiene un registro de la orientación del espín del fotón, revelará a través de qué rendija pasó un fotón dado en su camino hacia el detector.

Cuando se hace este nuevo experimento de doble-rendija-con-etiquetas, los fotones no forman una figura de interferencia, como en la figura 7.4a. Por ahora la explicación debería ser familiar; los nuevos aparatos de etiquetado permiten obtener la información qué-camino, y la información qué-camino distingue una historia u otra; los datos muestran que cualquier fotón dado pasó o bien por la rendija izquierda o bien por la rendija derecha. Y sin la combinación de trayectorias de rendija-izquierda y rendija-derecha, no hay ondas de probabilidad que se solapen, de modo que no se genera una figura de interferencia.

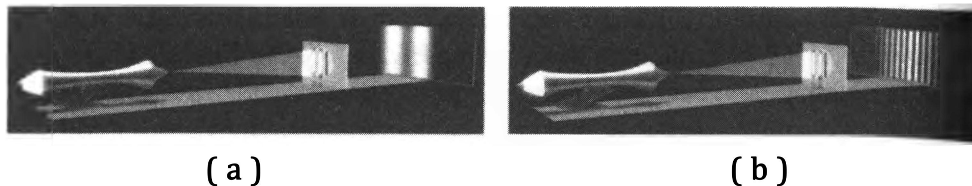


FIGURA 7.4. En el experimento del borrador cuántico, un aparato colocado ante las dos rendijas marca los fotones de modo que un examen posterior pueda revelar por qué rendija pasó cada fotón. En **(a)** vemos que esta información qué-camino destruye la figura de interferencia. En (b) se inserta un dispositivo que borra las marcas de los fotones justo delante de la pantalla detectora. Puesto que la información qué-camino es eliminada, la figura de interferencia desaparece.

Ahora viene la idea de Scully y Drühl. ¿Qué pasa si, inmediatamente antes de que el fotón incida en la pantalla detectora, usted elimina la posibilidad de determinar por qué rendija pasó borrando la marca impresa por el dispositivo etiquetador? Sin medios, siquiera en principio, de extraer la información qué-camino del fotón detectado, ¿entrarán en juego ambas clases de historias haciendo que vuelva a aparecer la figura de interferencia? Nótese que este tipo de «deshacer» el pasado caería más allá de la

categoría chocante de la captura de bola por parte del jugador de béisbol en la novena entrada. Cuando se conectan los aparatos de etiquetado, imaginamos que el fotón actúa obedientemente como una partícula, pasando por la rendija izquierda *o* por la derecha. Si de algún modo, inmediatamente antes de que incida en la pantalla, borramos la marca qué-rendija que lleva, parece que ya es demasiado tarde para permitir que se forme una figura de interferencia. Para la interferencia necesitamos que el fotón actúe como una onda. Debe pasar por ambas rendijas de modo que pueda cruzarse y mezclarse consigo mismo en el camino hacia la pantalla detectora. Pero nuestro etiquetado inicial del fotón parece garantizar que actúe como una partícula y pase por la rendija izquierda o por la rendija derecha, impidiendo que se produzca la interferencia.

En un experimento realizado por Raymond Chiao, Paul Kwiat y Aephraim Steinberg el montaje era, esquemáticamente, como el de la figura 7.4, con un nuevo dispositivo borrador insertado precisamente delante de la pantalla detectora. Una vez más, los detalles no son esenciales, pero dicho brevemente el borrador funciona asegurando que, independientemente de que entre un fotón procedente de la rendija izquierda o de la rendija derecha, su espín es manipulado para que apunte en una misma dirección fija. El examen posterior de su espín no da así ninguna información sobre la rendija que atravesó, y con ello la marca qué-camino ha sido borrada. Notablemente, los fotones detectados por la pantalla tras este borrado producen una figura de interferencia. Cuando se inserta el borrador precisamente delante de la pantalla detectora, deshace —borra— el efecto de haber etiquetado los fotones cuando estaban cerca de las rendijas. Como en el experimento de elección diferida, este tipo de borrado podría ocurrir en principio miles de millones de años antes

de la influencia que está frustrando, deshaciendo en efecto el pasado, incluso deshaciendo el pasado antiguo.

¿Cómo vamos a dar sentido a esto? Bien, tengamos en cuenta que los datos se ajustan perfectamente a la predicción teórica de la mecánica cuántica. Scully y Drühl propusieron este experimento porque sus cálculos mecanocuánticos les convencieron de que funcionaría. Y lo hace. Así que, como es habitual con la mecánica cuántica, el enigma no enfrenta la teoría con el experimento. Enfrenta la teoría, confirmada por el experimento, con nuestra sensación intuitiva del tiempo y la realidad. Para relajar la tensión, note que si usted colocara un *detector* de fotones delante de cada rendija, la lectura del detector establecería con certeza si el fotón pasó por la rendija izquierda o por la rendija derecha, y no habría ninguna forma de borrar esa información definitiva —no habría ninguna forma de recuperar una figura de interferencia—. Pero los dispositivos de etiquetado son diferentes porque sólo proporcionan el potencial para determinar la información qué-camino y las potencialidades son precisamente el tipo de cosas que pueden borrarse. Un dispositivo de etiquetado modifica un fotón que pasa de tal manera que, en términos aproximados, el fotón sigue atravesando ambos caminos, pero la parte izquierda de su onda de probabilidad está borrosa con respecto a la derecha, o la parte derecha de su onda de probabilidad está borrosa con respecto a la izquierda. A su vez, la secuencia ordenada de crestas y vientres que normalmente saldría de cada rendija —como en la figura 4.b— está también borrosa, de modo que ninguna figura de interferencia se forma en la pantalla detectora. La idea crucial, sin embargo, es que tanto la onda izquierda como la derecha siguen estando presentes. El borrador funciona porque reconcentra las ondas. Como harían unas gafas, compensa la borrosidad, vuelve a

enfocar las dos ondas y les permite combinarse de nuevo en una figura de interferencia. Es como si, una vez que los dispositivos de etiquetado cumplen su tarea, la figura de interferencia desapareciera de la visión pero quedara pacientemente en espera para que alguien o algo la resucite.

Esta explicación puede hacer al borrador cuántico un poco menos misterioso, pero aquí está el final: una variante sorprendente del experimento del borrador cuántico que desafía aún más las nociones convencionales de espacio y tiempo

Dando forma al pasado[*17]

Este experimento, el *borrador cuántico con elección diferida,* fue también propuesto por Scully y Drühl. Empieza con el experimento del borrador cuántico de la figura 7.1, modificado insertando dos denominados conversores-a-la-baja, uno en cada camino. Los converso- res a la baja son dispositivos que toman un fotón como entrada y producen dos fotones como salida, cada uno de ellos con la mitad de la energía («convertidos a la baja») del original. Uno de los dos fotones (llamado el fotón *señal)* es dirigido a lo largo del camino que hubiera seguido el fotón original hacia la pantalla detectora. El otro fotón producido por el conversor a la baja (llamado el fotón *ocioso)* es enviado en una dirección completamente diferente, como en la figura 7.5a. En cada realización del experimento podemos determinar qué camino hacia la pantalla toma el fotón original observando qué conversor a la baja escupe el fotón ocioso asociado. Y una vez más, la capacidad para recoger información qué-camino de los fotones señal —incluso si es totalmente indirecta, puesto que no estamos

interaccionando en absoluto con ningún fotón señal— tiene el efecto de impedir que no se forme ninguna figura de interferencia.

Ahora viene la parte más extraña. ¿Que pasa si manipulamos el experimento de modo que resulte imposible determinar de qué conversor a la baja salió un fotón ocioso dado? Es decir, ¿qué pasa si borramos la información qué-camino encarnada en el fotón ocioso? Bien, algo sorprendente sucede: incluso si no hemos hecho nada directamente con los fotones señal, al borrar la información qué-camino que llevan sus asociados ociosos podemos recuperar una figura de interferencia de los fotones señal. Déjeme mostrarle cómo sucede esto porque es verdaderamente notable.

Echemos una mirada a la figura 7.2b, que incorpora todas las ideas esenciales. Pero no se sienta intimidado. Es más simple de lo que parece, y ahora la recorreremos en pasos tratables. El montaje de la figura 7.5b difiere del de la figura 7.5a en la forma en que detectamos los fotones ociosos después de que hayan sido emitidos. En la figura 7.3a los detectábamos directamente, y por eso podíamos determinar inmediatamente de qué conversor a la baja procedía cada uno —es decir, qué camino siguió un fotón señal dado—. En el nuevo experimento, cada fotón ocioso es enviado a través de un laberinto, lo que compromete nuestra capacidad para hacer esa determinación. Por ejemplo, imagine que un fotón ocioso es emitido desde el conversor a la baja etiquetado «I». En lugar de entrar inmediatamente en un detector (como en la figura 7.5a) este fotón es enviado a un divisor de haz (etiquetado «a») y por ello tiene un 50 por 100 de probabilidades de dirigirse a lo largo del camino etiquetado «A» y un 50 por 100 de probabilidades de dirigirse a lo largo del camino etiquetado «B». Si se dirigiera a lo largo del camino A entraría en un

detector de fotones (etiquetado «1») y su llegada sería oportunamente registrada. Pero si el fotón ocioso siguiera el camino B estaría sometido todavía a más penalidades. Sería dirigido a otro divisor de haz (etiquetado «c») y por ello tendría un 50 por 100 de probabilidades de dirigirse a lo largo del camino E al detector etiquetado «2», y un 50 por 100 de probabilidades de dirigirse a lo largo del camino F al detector etiquetado «3». Ahora —quédese conmigo, pues hay un punto importante en todo esto— exactamente el mismo razonamiento, cuando se aplica a un fotón ocioso emitido desde el otro conversor a la baja, etiquetado «D», nos dice que si el fotón ocioso se dirige a lo largo del camino G será registrado por el detector 4, pero si se dirige a lo largo del camino C será detectado o por el detector 3 o por el detector 2, dependiendo del camino que siga después de pasar por el divisor de haz c.

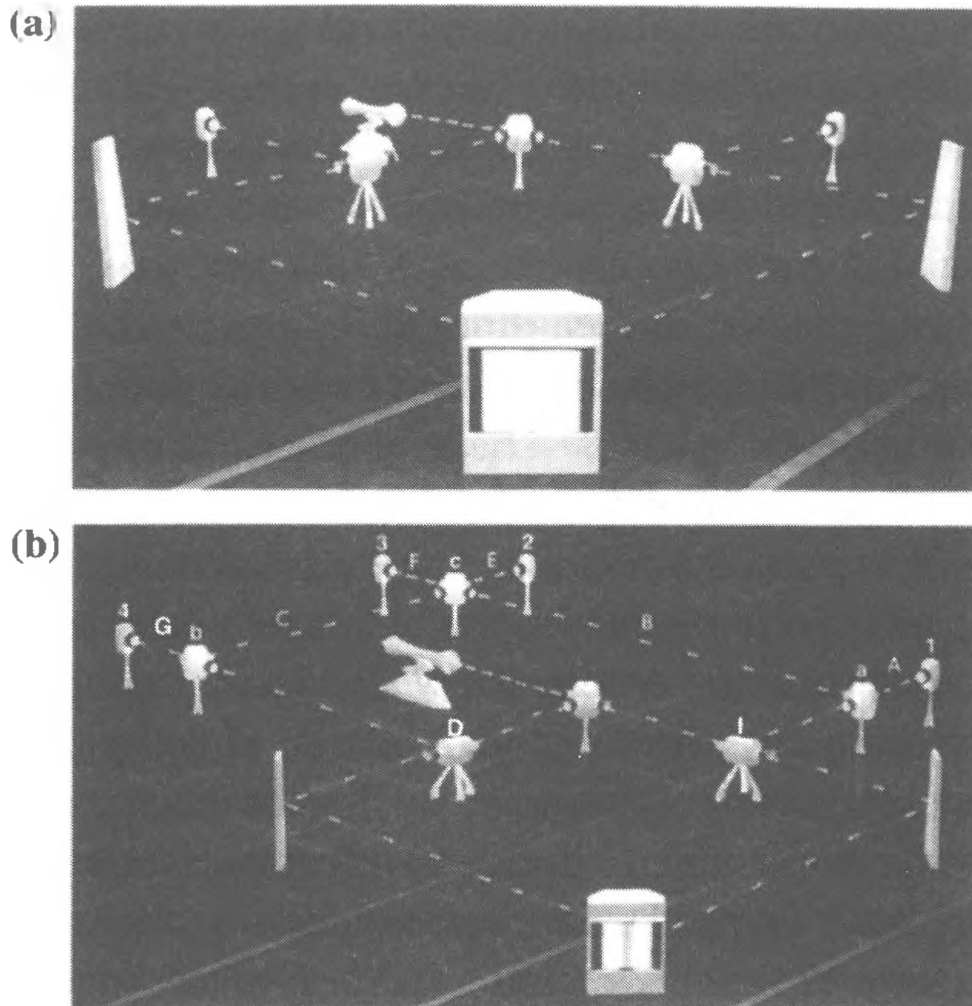


FIGURA 7.5. **(a)** Un experimento con divisor de haz, ampliado con conversores a la baja, no da una figura de interferencia, puesto que los fotones ociosos dan información qué-camino. (b) Si los fotones ociosos no se detectan directamente, sino que en su lugar se envían a través del laberinto mostrado, entonces a partir de los datos puede extraerse una figura de interferencia. Los fotones ociosos que son detectados por los detectores 2 o 3 no dan información qué-camino y por ello sus fotones señal llenarán una figura de interferencia.

Vayamos ahora a por qué hemos añadido toda esta complicación. Note que si un fotón ocioso es detectado por el detector 1, aprendemos que el correspondiente fotón señal siguió el camino izquierdo, puesto que no hay modo

de que un fotón ocioso que fue emitido desde el conversor a la baja D encuentre su camino a este detector. Análogamente, si un fotón ocioso es detectado por el detector 4, aprendemos que su fotón señal asociado siguió el camino derecho. Pero si un fotón ocioso acaba en el detector 2, no tenemos ninguna idea de qué camino siguió su fotón señal asociado puesto que hay la misma probabilidad de que fuera emitido por el conversor a la baja I y siguiera el camino BE, o que fuera emitido por el conversor a la baja D y siguiera el camino C-E. Análogamente, si un fotón ocioso es detectado por el detector 3, podría haber sido emitido por el conversor a la baja I y haber recorrido el camino B-F, o por el conversor a la baja D y seguido el camino C-F. Así pues, *para fotones señal cuyos compañeros ociosos son detectados por el detector 1 o el 4, tenemos información qué-camino, pero para aquellos cuyos compañeros ociosos son detectados por el detector 2 o el 3, la información qué-camino está borrada.*

¿Significa este borrado de parte de la información qué-camino —incluso si no hemos hecho *nada directamente* a los fotones señal— que pueden recuperarse los efectos de interferencia? De hecho lo hace —pero sólo para aquellos fotones señal cuyos asociados acabaron en el detector 2 o el detector 3. A saber, la totalidad de las posiciones de impacto de los fotones señal en la pantalla se verá como los datos de la figura 7.5a, *sin mostrar el más mínimo indicio de una figura de interferencia,* como es característico de los fotones que han seguido un camino u otro. Pero si nos centramos en un subconjunto de los puntos —por ejemplo, en aquellos fotones señal cuyos ociosos entran en el detector 2— entonces ese conjunto de puntos *llenará* una figura de interferencia. Estos fotones señal —cuyos ociosos, por azar, no proporcionan ninguna información qué-camino — ¡actúan como si hubieran seguido ambos caminos! Si

conectamos el aparato de modo que la pantalla muestre un punto rojo para la posición de cada fotón señal cuyo compañero ocioso fuera detectado por el detector 2, y un punto verde para todos los demás, alguien que fuese ciego a los colores no vería ninguna figura de interferencia, pero cualquier otro vería que los puntos rojos estaban dispuestos en bandas brillantes y oscuras —una figura de interferencia—. Lo mismo es cierto con el detector 3 en lugar del detector 2. Pero no habría tal figura de interferencia si distinguimos los fotones señal cuyos ociosos acaban en el detector 1 o en el detector 4, puesto que son los ociosos los que dan información qué-camino sobre sus asociados.

Estos resultados —que han sido confirmados por los experimentos—[7.5] son espectaculares: al incluir conversores a la baja que tienen el potencial de ofrecer información qué-camino, perdemos la figura de interferencia, como en la figura 7.a. Y sin interferencia, deberíamos concluir de forma natural que cada fotón siguió el camino izquierdo o el camino derecho. Pero ahora vemos que esta sería una conclusión precipitada. Eliminando cuidadosamente la información potencial qué-camino que llevan algunos de los ociosos, podemos tratar los datos para que den una figura de interferencia, lo que indica que algunos de los fotones siguieron realmente ambos caminos.

Note también el resultado quizá más espectacular de todos: los tres divisores de haz adicionales y los cuatro detectores de fotones ociosos pueden estar en el otro extremo del laboratorio o incluso en el otro extremo del universo, puesto que nada en nuestra discusión dependía en absoluto de si recibían un fotón ocioso dado antes o después de que su fotón señal asociado haya incidido en la pantalla. Imaginemos, entonces, que todos estos aparatos están muy alejados, digamos a diez años luz de distancia, para ser precisos, y pensemos en lo que ello implica. Usted

realiza el experimento de la figura 7.5b hoy, registrando, uno tras otro, los lugares de impacto de un número enorme de fotones señal, y observa que no muestran ningún signo de interferencia. Si alguien le pide que explique los datos, usted podría verse tentado a decir que, debido a los fotones ociosos, hay información qué-camino disponible y por ello cada fotón señal siguió decididamente el camino izquierdo o el camino derecho, eliminando cualquier posibilidad de interferencia. Pero, como antes, ésta sería una conclusión precipitada sobre lo que sucedió; sería una discusión muy prematura del pasado.

En efecto, diez años más tarde el cuarto detector recibirá —uno

tras otro— los fotones ociosos. Si usted es informado posteriormente de qué ociosos llegaron, digamos, al detector 2 (e. g., llegan el primero, séptimo, octavo, duodécimo… de los ociosos), y si usted vuelve entonces a los datos que recogió años antes y marca la correspondiente señal de los lugares de los fotones en la pantalla (e. g., el primero, séptimo, duodécimo… de los fotones señal que llegaron), encontrará que los puntos marcados formarán una figura de interferencia, lo que revela que aquellos fotones señal deberían describirse como si hubieran recorrido ambos caminos. Alternativamente, si 9 años y 364 días después de que usted recogiera los datos de los fotones señal, un bromista saboteara el experimento eliminando los divisores de haz a y b —asegurando que cuando lleguen los fotones ociosos al día siguiente todos van o bien al detector 1 o bien al detector 4, conservando así *toda* la información qué-camino— entonces, cuando usted reciba esta información concluirá que *cada* fotón señal fue o bien por el camino izquierdo o bien por el camino derecho, y no habrá ninguna figura de interferencia que extraer de los datos de los fotones señal. Así pues,

como esta discusión destaca con fuerza, la historia que usted habría contado para explicar los datos de los fotones señal depende significativamente de medidas realizadas diez años después de que se recogieran dichos datos.

Déjeme resaltar una vez más que las medidas futuras no cambian nada en absoluto de las cosas que tuvieron lugar en su experimento de hoy; las medidas futuras no cambian de ningún modo los datos que usted recogió hoy. Pero las medidas futuras *sí* influyen en los detalles a los que usted puede acudir cuando describa posteriormente lo que sucedió hoy. Antes de que usted tenga los resultados de las medidas de los fotones ociosos no puede decir nada en absoluto sobre la historia qué-camino de cualquier fotón señal dado. Sin embargo, una vez que tiene los resultados, usted concluye que los fotones señal cuyos asociados ociosos fueron utilizados satisfactoriamente para obtener información qué-camino pueden describirse como si hubieran viajado —años antes— a través del camino izquierdo o del camino derecho. Usted concluye también que *los fotones señal cuyos asociados ociosos tenían borrada su información qué-camino* no pueden describirse como si —años antes— hubieran seguido decididamente un camino o el otro (una conclusión que puede confirmar convincentemente utilizando los datos de fotones ociosos recién adquiridos para poner de manifiesto la figura de interferencia antes oculta en esta última clase de fotones señal). Vemos así que el futuro ayuda a conformar la historia que cuenta usted del pasado.

Estos experimentos son una tremenda afrenta para nuestras nociones convencionales de espacio y tiempo. Algo que tiene lugar mucho más tarde y muy lejos de alguna otra cosa es de todas formas vital para nuestra descripción de esa otra cosa. Para cualquier razonamiento clásico —de sentido común— eso es una locura. Por supuesto, ésa es la

clave: el razonamiento clásico es el tipo que razonamiento que no se puede utilizar en un universo cuántico. De la discusión de Einstein- Podolsky-Rosen hemos aprendido que la física cuántica no es local en el espacio. Si usted ha asimilado perfectamente esta lección —dura de aceptar por sí misma— estos experimentos, que implican un tipo de entrelazamiento a lo largo del espacio y a través del tiempo, quizá no parezcan totalmente extravagantes. Pero ciertamente lo son para los cánones de la experiencia diaria.

Mecánica cuántica y experiencia

Recuerdo que cuando supe por primera vez de estos experimentos tardé unos días en recuperarme. Tenía la sensación de que había alcanzado a ver el lado velado de la realidad. La experiencia común —las actividades mundanas y ordinarias del día a día— parecía repentinamente formar parte de una charada clásica que oculta la verdadera naturaleza de nuestro mundo cuántico. El mundo de lo cotidiano parecía repentinamente no otra cosa que un juego de magia invertido, un acto que lleva a su audiencia a creer en las ideas usuales y familiares de espacio y tiempo mientras la sorprendente verdad de la realidad cuántica yace cuidadosamente oculta por los juegos de manos de la Naturaleza.

En años recientes, los físicos han dedicado mucho esfuerzo a tratar de explicar la Naturaleza —a descubrir de qué forma precisa las leyes fundamentales de la física cuántica se transforman en las leyes clásicas que son tan acertadas para explicar la experiencia común— en esencia, descubrir cómo lo atómico y lo subatómico pierden su extrañeza mágica cuando se combinan para formar objetos

macroscópicos. La investigación continúa, pero ya se ha aprendido mucho. Veamos algunos aspectos de particular relevancia para la cuestión de la flecha del tiempo, pero ahora desde el punto de vista de la mecánica cuántica.

La mecánica clásica se basa en las ecuaciones que descubrió Newton a finales del siglo xvii. El electromagnetismo se basa en ecuaciones que descubrió Maxwell a finales del siglo xix. La relatividad especial se basa en ecuaciones que descubrió Einstein en 1905, y la relatividad general se basa en ecuaciones que él descubrió en 1915. Lo que todas estas ecuaciones tienen en común, y lo que es fundamental para el dilema de la flecha del tiempo —como se explicó en el último capítulo— es su tratamiento completamente simétrico de pasado y futuro. En ningún lugar en ninguna de estas ecuaciones hay algo que distinga «hacia delante en el tiempo» de «hacia atrás en el tiempo». Pasado y futuro están en pie de igualdad.

La mecánica cuántica se basa en una ecuación que descubrió Erwin Schródinger en 1926.[7.6] Usted no necesita saber nada sobre esta ecuación aparte del hecho de que toma como ingrediente la forma de una onda de probabilidad mecanocuántica en un instante de tiempo, tal como en la figura 4.5, y permite determinar cómo será la onda de probabilidad en cualquier otro instante, antes o después. Si la onda de probabilidad está asociada con una partícula, tal como un electrón, usted puede utilizarla para predecir la probabilidad de que, en cualquier instante específico, un experimento encuentre al electrón en cualquier lugar específico. Como las leyes clásicas de Newton, Maxwell y Einstein, la ley cuántica de Schródinger incluye un tratamiento igualitario del tiempo futuro y el tiempo pasado. Una «película» que muestre una onda de probabilidad que empieza de *esta* forma y termina de *aquélla* podría pasarse a la inversa —mostrando una onda

de probabilidad que empieza de *aquella* forma y termina de *ésta*— y no habría ninguna manera de decir que una evolución era correcta y la otra era falsa. Ambas serían soluciones igualmente válidas de la ecuación de Schródinger. Ambas representarían maneras igualmente razonables en que podrían evolucionar las cosas[7.7]

Por supuesto, la «película» ahora mencionada es completamente diferente de las utilizadas al analizar el movimiento de una pelota de tenis o un huevo aplastado en el último capítulo. Las ondas de probabilidad no son cosas que podamos ver directamente; no hay cámaras que puedan captar las ondas de probabilidad en una película. En su lugar, podemos describir ondas de probabilidad utilizando ecuaciones matemáticas y, mentalmente, podemos imaginar las más simples de ellas con formas como las de las figuras 4.5 y 4.6. Pero el único acceso que tenemos a las propias ondas de probabilidad es indirecto, mediante el proceso de medida.

Es decir, como se subrayó en el capítulo 4 y se ve repetidamente en los experimentos anteriores, la formulación estándar de la mecánica cuántica describe el desarrollo de los fenómenos utilizando *dos* fases completamente diferentes. En la primera, la onda de probabilidad —o, en el lenguaje más preciso del campo, *la función de onda*— de un objeto tal como un electrón evoluciona según la ecuación descubierta por Schródinger. Esta ecuación asegura que la forma de la función de onda cambia suave y gradualmente, de forma muy parecida a como una ola cambia de forma cuando viaja de un lado a otro en un lago. [*18] En la descripción estándar de la segunda fase tomamos contacto con la realidad observable midiendo la posición del electrón, y cuando lo hacemos la forma de la función de onda cambia abruptamente. La función de onda del electrón es diferente de los ejemplos

más familiares de las ondas de agua y las ondas sonoras: cuando medimos la posición del electrón, su función de onda se hace puntiaguda o, como se ilustra en la figura 4.7, colapsa, cayendo al valor cero en todo lugar en donde no se ha encontrado la partícula y elevándose al 100 por 100 de probabilidad en el único lugar en donde la partícula es encontrada por la medida.

La fase uno —la evolución de la función de onda según la ecuación de SchrSdi nger— es matemáticamente rigurosa, totalmente inequívoca y plenamente aceptada por la comunidad física. Por el contrario, la fase dos —el colapso de una función de onda bajo medida— es algo que durante las ocho últimas décadas ha mantenido a los físicos, en el mejor de los casos, ligeramente confusos, y en el peor de los casos ha planteado problemas, enigmas y paradojas potenciales que han arruinado carreras. La dificultad, como se mencionó al final del capítulo 4, es que según la ecuación de Schródinger las funciones de onda *no* colapsan. El colapso de la función de onda es un añadido. Fue introducido después de que Schródinger descubriera su ecuación, en un intento por explicar lo que realmente ven los experimentadores. Mientras que una función de onda en bruto y no colapsada encarna la extraña idea de que una partícula está a la vez aquí y allí, los experimentadores nunca ven esto. Ellos siempre encuentran una partícula decididamente en un lugar u otro; nunca la ven parcialmente aquí y parcialmente allí; la aguja de sus aparatos de medida nunca se mantiene en una mezcla fantasmagórica de apuntar a este valor y también a ese valor.

Lo mismo sucede, por supuesto, con nuestras observaciones casuales del mundo que nos rodea. Nunca observamos que una silla esté a la vez aquí y allí; nunca observamos que la Luna esté en una parte del cielo

nocturno tanto como en otra; nunca vemos un gato que esté a la vez muerto y vivo. La noción de colapso de la función de onda se pone de acuerdo con nuestra experiencia al postular que el acto de medida hace que la función abandone el limbo cuántico y acomoda a una de las muchas potencialidades (partícula aquí, o partícula allí) en la realidad.

El rompecabezas de la medida cuántica

Pero ¿cómo el acto de la medida por parte de un experimentador hace que colapse una función de onda? De hecho, ¿sucede realmente el colapso de la función de onda, y si lo hace, qué pasa realmente en el nivel microscópico? ¿Cualquier medida produce un colapso? ¿Cuándo sucede el colapso y cuánto dura? Puesto que, según la ecuación de Schródinger, las funciones de onda no colapsan, ¿qué ecuación domina en la segunda fase de la evolución cuántica, y cómo destrona esta nueva ecuación a la de Schródinger, usurpando su poder férreo sobre los procesos cuánticos? Y, lo que es importante para nuestro interés actual en la flecha del tiempo, mientras que la ecuación de Schródinger, la ecuación que gobierna la primera fase, no hace distinción entre adelante y atrás en el tiempo, ¿introduce la ecuación para la fase dos una asimetría fundamental entre el tiempo antes y el tiempo después de que se realice una medida? Es decir, ¿introduce la mecánica cuántica, *incluyendo su interfaz con el mundo de lo cotidiano vía medidas y observaciones,* una flecha del tiempo en las leyes básicas de la física? Después de todo, antes discutimos cómo el tratamiento cuántico del pasado difiere del de la física clásica, y por *pasado* entendíamos antes de que hubiera tenido lugar una observación o

medida concreta. Así que ¿establecen las medidas, con el colapso de la función de onda incorporado en la fase dos, una asimetría entre pasado y futuro, entre antes y después de que se haga una medida?

Estas preguntas se han resistido tozudamente a una solución completa y siguen siendo controvertidas. Pese a todo, a lo largo de décadas, el poder predictivo de la teoría cuántica apenas se ha visto comprometido. La formulación fase uno/fase dos de la teoría cuántica, incluso si la fase dos ha seguido siendo misteriosa, predice probabilidades de medir un resultado u otro y estas predicciones han sido confirmadas repitiendo un experimento dado una y otra vez y examinando la frecuencia con que se encuentra uno u otro resultado. El fantástico éxito experimental de esta aproximación ha contrapesado con creces la incomodidad de no tener una articulación precisa de lo que realmente sucede en la fase dos.

Pero la incomodidad ha existido siempre. Y no se trata simplemente de que todavía no se hayan desarrollado completamente algunos detalles del colapso de la función de onda. El *problema de la medida cuántica,* como se denomina, es una cuestión que afecta a los límites y la universalidad de la mecánica cuántica. Es sencillo de ver. La aproximación fase uno/fase dos introduce una separación entre lo que está siendo observado (un electrón, o un protón, o un átomo, por ejemplo) y el experimentador que hace la observación. Antes de que

el experimentador entre en escena, las funciones de onda evolucionan feliz y suavemente según la ecuación de Schródinger. Pero luego, cuando el experimentador se mezcla con las cosas para realizar una medida, las reglas del juego cambian repentinamente. La ecuación de Schródinger es dejada de lado y domina el colapso de la fase dos. Pese a todo, puesto que no hay ninguna diferencia

entre los átomos, protones y electrones que constituyen el experimentador y el aparato que utiliza, y los átomos, protones y electrones que estudia, ¿por qué dian- tres hay una división en cómo los trata la mecánica cuántica? Si la mecánica cuántica es una teoría universal que se aplica a *todo* sin limitaciones, lo observado y el observador deberían ser tratados exactamente de la misma manera.

Niels Bohr discrepaba. Él afirmaba que los experimentadores y sus equipos *son* diferentes de las partículas elementales. Incluso si están hechos de las mismas partículas, ellos son conjuntos «grandes» de partículas elementales y por ello están gobernados por las leyes de la física clásica. En alguna parte entre el mundo minúsculo de los átomos y partículas subatómicas individuales y el mundo familiar de las personas y sus aparatos, las reglas cambian porque los tamaños cambian. La motivación para afirmar esta división está clara: una partícula minúscula, según la mecánica cuántica, puede estar localizada en una mezcla borrosa de aquí y allí, pero nosotros no vemos este comportamiento en el mundo grande y cotidiano. Pero ¿dónde está exactamente la frontera? Y, de vital importancia, ¿cómo se conectan los dos conjuntos de reglas cuando el gran mundo de lo cotidiano se confronta con el mundo minúsculo de lo atómico, como en el caso de una medida? Bohr afirmaba decididamente que estas preguntas no se plantean, por lo que él entendía, a decir verdad, que estaban más allá de los límites de lo que él o cualquier otro podía responder. Y puesto que incluso sin abordarlas la teoría hace predicciones sorprendentemente precisas, durante mucho tiempo tales preguntas quedaban muy abajo en la lista de preguntas críticas que los físicos se veían impulsados a zanjar.

Pero para comprender por completo la mecánica cuántica, para determinar plenamente lo que dice sobre la

realidad y para establecer qué papel podría desempeñar en establecer una dirección para la flecha del tiempo, debemos entender el problema de la medida cuántica.

En las dos secciones siguientes describiremos algunos de los más destacados y prometedores intentos de hacerlo. La conclusión, por si usted quisiera en cualquier momento pasar a la última sección que se centra en la mecánica cuántica y la flecha del tiempo, es que mucho trabajo ingenioso sobre el problema de la medida cuántica ha proporcionado un progreso significativo, pero una solución generalmente aceptada aún parece más allá de nuestro alcance. Muchos ven esto como la laguna más importante en nuestra formulación de la ley cuántica.

La realidad y el problema de la medida cuántica

Durante años ha habido muchas propuestas para resolver el problema de la medida cuántica. Irónicamente, aunque implican concepciones diferentes de la realidad —algunas drásticamente diferentes— cuando se trata de predicciones de lo que medirá un investigador en casi cualquier experimento, todas coinciden y cada una funciona de maravilla. Cada propuesta supone el mismo espectáculo, aunque, si usted echara una mirada a lo que hay detrás del escenario, vería que sus modi ope- randi difieren sustancialmente.

Cuando se trata de entretenimiento, usted generalmente no quiere saber qué está sucediendo entre bastidores; está muy contento centrándose solamente en el resultado. Pero cuando se trata de entender el universo, hay una sed insaciable de correr todas las cortinas, abrir todas las puertas y mostrar por completo los mecanismos internos de la realidad. Bohr consideraba que este impulso no tenía

fundamento y estaba equivocado. Para él la realidad era la representación. Como sucede en un monólogo de Spalding Gray, las medidas desnudas de un experimentador *son* el espectáculo completo. No hay nada más. Según Bohr, no hay bastidores. Tratar de analizar cómo, cuándo y por qué una función de onda cuántica renuncia a todas las posibilidades salvo una y da un único número definido en un aparato de medida es errar la cuestión. El número medido es todo lo que es digno de atención.

Durante décadas, esta perspectiva dominó. Sin embargo, y a pesar de su efecto tranquilizador en la lucha de la mente con la teoría cuántica, uno no puede dejar de tener la sensación de que el fantástico poder predictivo de la mecánica cuántica significa que está dando con una realidad oculta que subyace a los mecanismos del universo. Uno no puede dejar de querer ir más allá y entender cómo se conecta la mecánica cuántica con la experiencia común —cómo salva el hueco entre función de onda y observación, y qué realidad oculta subyace a las observaciones—. Durante años, varios investigadores han asumido este desafío; aquí hay algunas propuestas que han desarrollado.

Una aproximación, con raíces históricas que se remontan a Hei- senberg, consiste en abandonar la idea de que las funciones de onda son características objetivas de la realidad cuántica y, en su lugar, verlas simplemente como una encarnación de lo que sabemos de la realidad. Según esta idea, antes de que realicemos un experimento no sabemos dónde está el electrón, y nuestra ignorancia de su posición se refleja en que la función de onda del electrón lo describe como si estuviera en varias posiciones diferentes. En el momento que medimos su posición, sin embargo, nuestro conocimiento de su paradero cambia repentinamente: ahora conocemos su posición, en principio, con total precisión. (Por el principio de incertidumbre, si

conocemos su posición, necesariamente seremos completamente ignorantes acerca de su velocidad, pero ésa no es una cuestión para la discusión actual.) El cambio repentino en nuestro conocimiento, según esta perspectiva, se refleja en un cambio repentino en la función de onda del electrón: repentinamente colapsa y toma la forma puntiaguda de la figura 4.7, que indica nuestro conocimiento decidido de la posición del electrón. En esta aproximación, el colapso abrupto de una función de onda no es nada sorprendente: no es otra cosa que el cambio abrupto en el conocimiento que todos experimentamos cuando aprendemos algo nuevo.

Una segunda aproximación, iniciada en 1957 por un estudiante de Wheeler, Hugh Everett, niega que las funciones de onda colapsen nunca. En su lugar, todos y cada uno de los resultados potenciales encarnados en una función de onda ven la luz del día; la luz que ve cada uno, sin embargo, penetra a través de su propio universo independiente. En esta aproximación, la interpretación de los *Muchos Mundos,* el concepto de «el universo» se amplía para incluir innumerables «universos paralelos» —innumerables versiones de nuestro universo— de modo que cualquier cosa que la mecánica cuántica predice que *podría* suceder, incluso si sólo fuera con probabilidad minúscula, *sí* sucede al menos en una de las copias. Si una función de onda dice que un electrón puede estar aquí, ahí y más allá, entonces en un universo una versión de usted lo encontrará aquí; en otro universo, otra copia de usted lo encontrará ahí; y en un tercer universo, todavía otro usted encontrará al electrón más allá. La secuencia de observaciones que cada uno de nosotros hacemos de un segundo al siguiente refleja así la realidad que tiene lugar en sólo una parte de esta red infinita y gigantesca de universos, cada uno de ellos poblado por copias de usted y yo y cualquier otro que

siga estando vivo en un universo en el que ciertas observaciones han dado ciertos resultados. En uno de esos universos usted está ahora leyendo estas palabras, en otro se ha tomado un descanso para navegar por la web, en otro está esperando ansiosamente que se levante el telón para su debut en Broadway. Es como si no hubiera un único bloque espaciotemporal como se mostraba en la figura 5.1, sino un número infinito, en cada uno de los cuales se realiza un curso de sucesos posible. En la aproximación de los Muchos Mundos ningún resultado potencial queda simplemente como potencial. Las funciones de onda no colapsan. Cada resultado potencial se da en uno de los universos paralelos.

Una tercera propuesta, desarrollada en la década de 1950 por David Bohm —el mismo físico que encontramos en el capítulo 4 cuando discutimos la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen— adopta una aproximación completamente diferente.**[7.8]** Bohm argumentaba que partículas tales como los electrones poseen posiciones definidas y velocidades definidas, como en la física clásica y como Einstein había esperado. Pero, en consonancia con el principio de incertidumbre, estas características están ocultas a la vista; son ejemplos de las *variables ocultas* mencionadas en el capítulo 4. Usted no puede determinar ambas simultáneamente. Para Bohm tal incertidumbre representaba un límite a lo que podemos conocer, pero no implicaba nada sobre los atributos reales de las propias partículas. Su aproximación no entra en conflicto con los resultados de Bell porque, como discutimos hacia el final del capítulo 4, poseer propiedades definidas prohibidas por la incertidumbre cuántica no está descartado; sólo la localidad está descartada, y la aproximación de Bohm es *no* local.**[7.9]** En su lugar, Bohm imaginaba que la función de onda de una partícula es otro *elemento independiente de la realidad,* un

elemento que existe *además de la propia partícula.* No se trata de partículas *u* ondas, como en la filosofía de la complementariedad de Bohr; según Bohm, se trata de partículas *y* ondas. Además, Bohm postulaba que la función de onda de una partícula interacciona con la propia partícula —«guía» o «empuja» a la partícula— de una manera que determina su movimiento posterior. Aunque esta aproximación está en completo acuerdo con las predicciones acertadas de la mecánica cuántica estándar, Bohm encontró que cambios en la función de onda en un lugar son capaces de empujar inmediatamente a una partícula en un lugar distante, un hallazgo que pone de manifiesto explícitamente la no localidad de su aproximación. En el experimento de la doble rendija, por ejemplo, cada partícula pasa por una rendija o por la otra, mientras que su función de onda atraviesa ambas y sufre interferencia. Puesto que la función de onda guía el movimiento de la partícula, no debería sorprender demasiado que las ecuaciones muestren que es probable que la partícula aterrice donde el valor de la función de onda es grande y es poco probable que aterrice donde es pequeño, lo que explica los datos de la figura 4.4. En la aproximación de Bohm, no hay una fase separada de colapso de la función de onda puesto que, si se mide la posición de una partícula y se la encuentra *aquí,* es aquí donde verdaderamente estaba un momento antes de que tuviera lugar la medida.

Una cuarta aproximación, desarrollada por los físicos italianos Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber, hace la atrevida jugada de modificar la ecuación de Schródinger de una forma ingeniosa que apenas tiene ningún efecto sobre la evolución de las partículas individuales, pero tiene un impacto espectacular sobre la evolución cuántica cuando se aplica a «grandes» objetos

cotidianos. La modificación propuesta imagina que las funciones de onda son intrínsecamente inestables; incluso sin ninguna mezcla, sugieren estos investigadores, tarde o temprano cada función de onda colapsa por sí misma a una forma puntiaguda. Para una partícula individual, Ghirardi, Rimini y Weber postulan que el colapso de la función de onda sucede espontánea y aleatoriamente, en promedio, sólo una vez cada mil millones de años aproximadamente. **[7.10]** Esto es tan infrecuente que sólo implica un mínimo cambio para la descripción mecanocuántica usual de las partículas individuales, y eso es bueno, puesto que la mecánica cuántica describe el micromundo con una exactitud sin precedentes. Pero para objetos grandes tales como los experimentadores y sus aparatos, que tienen trillones y trillones de partículas, hay altas probabilidades de que en una minúscula fracción de cualquier segundo dado el colapso espontáneo postulado actuará en al menos una partícula constituyente, haciendo que su función de onda colapse. Y, como argumentaban Ghirardi, Rimini, Weber y otros, la naturaleza entrelazada de todas las funciones de onda individuales en un objeto grande asegura que este colapso desencadena una especie de efecto dominó cuántico en el que las funciones de onda de todas las partículas constituyentes colapsan también. Puesto que esto sucede en una breve fracción de segundo, la modificación propuesta asegura que los objetos grandes están siempre esencialmente en una configuración definida: los punteros en el aparato de medida apuntan siempre a un valor definido; la Luna está siempre en un lugar definido en el cielo; los cerebros dentro de los experimentadores tienen siempre una experiencia definida; los gatos están siempre o muertos o vivos.

Cada una de estas aproximaciones, así como otras varias que no voy a discutir, tiene sus defensores y sus

detractores. La aproximación «función de onda como conocimiento» resuelve la cuestión del colapso de la función de onda negando cualquier realidad a las funciones de onda, convirtiéndolas en su lugar en meros descriptores de lo que conocemos. Pero ¿por qué, pregunta un detractor, debería estar la física fundamental tan íntimamente unida a la conciencia humana? Si no estuviésemos aquí para observar el mundo, ¿colapsarían alguna vez las funciones de onda o, quizá, no existiría el concepto mismo de una función de onda? ¿Era el universo un lugar completamente diferente antes de que evolucionase la conciencia humana en el planeta Tierra? ¿Qué pasaría si, en lugar de experimentadores humanos, los únicos observadores fueran ratones u hormigas o amebas o computadores? ¿Es adecuado el cambio en su «conocimiento» para estar asociado con el colapso de una función de onda?[7.11]

Por el contrario, la interpretación de los Muchos Mundos evita la cuestión del colapso de la función de onda, puesto que en esta aproximación las funciones de onda no colapsan. Pero el precio a pagar es una enorme proliferación de universos, un precio que más de un detractor ha encontrado intolerablemente exorbitante.[7.12] La aproximación de Bohm también evita el colapso de la función de onda; pero, afirman sus detractores, al conceder realidad independiente a partículas y a ondas, la teoría carece de economía. Además, argumentan correctamente los detractores, en la formulación de Bohm la función de onda puede ejercer influencias más rápidas que la luz sobre las partículas que empuja. Los defensores señalan que la primera queja es como mucho subjetiva, y la última se ajusta a la no localidad que Bell demostró que era inevitable, de modo que ninguna de las dos críticas es convincente. De todas formas, quizá injustificablemente, la aproximación de Bohm no ha calado nunca.[7.13] La

aproximación de Ghirardi, Rimini y Weber trata directamente el colapso de la función de onda, cambiando las ecuaciones para incorporar un nuevo mecanismo de colapso espontáneo. Pero, señalan los detractores, todavía no hay un ápice de evidencia experimental que apoye la modificación propuesta de la ecuación de Schródinger.

La investigación en busca de una conexión sólida y completamente transparente entre el formalismo de la mecánica cuántica y la experiencia de la vida cotidiana seguirá sin duda durante algún tiempo en el futuro, y es difícil decir cuál de las aproximaciones conocidas, si lo hace alguna de ellas, conseguirá finalmente un consenso mayoritario. Si se hiciese hoy una encuesta entre los físicos, no creo que hubiera una favorita aplastante. Por desgracia, el aporte experimental es de ayuda limitada. Aunque la propuesta de Ghirardi, Rimini y Weber hace predicciones que, en ciertas situaciones, difieren de la mecánica cuántica fase uno/fase dos estándar, las desviaciones son demasiado pequeñas para ser puestas a prueba con la tecnología de hoy. La situación con las otras dos propuestas es peor porque impiden un veredicto experimental de manera aún más definitiva. Coinciden plenamente con la aproximación estándar, y por ello, cada una de ellas da las mismas predicciones para cosas que puedan ser observadas y medidas. Difieren sólo en lo que sucede entre bastidores, por así decir. Es decir, sólo difieren con respecto a lo que la mecánica cuántica implica para la naturaleza subyacente de la realidad.

Incluso si el problema de la medida cuántica sigue sin estar resuelto, durante las últimas décadas se ha estado desarrollando un marco que, aunque aún incompleto, tiene un amplio soporte como ingrediente probable de cualquier solución viable. Se denomina *decoherencia.*

La decoherencia y la realidad cuántica

Cuando uno se encuentra por primera vez con el aspecto probabilista de la mecánica cuántica, una reacción natural es pensar que no es más exótico que las probabilidades que aparecen en lanzamientos de dados o en la ruleta. Pero cuando estudia la interferencia cuántica se da cuenta de que la probabilidad interviene en la mecánica cuántica de una forma mucho más fundamental. En los ejemplos cotidianos se asignan probabilidades a varios resultados —caras *versus* cruces, rojo *versus* negro, un número de lotería *versus* otro— en el bien entendido de que uno u otro resultado sucederá definitivamente y que cada resultado es el producto final de una historia definida e independiente. Cuando se lanza una moneda, a veces su movimiento giratorio es el preciso para que salga cara y a veces es el preciso para que salga cruz. La probabilidad 5050 que asignamos a cada resultado se refiere no sólo al resultado final —caras o cruces— sino también a las historias que llevan a cada resultado. La mitad de las maneras posibles de lanzar una moneda dan un resultado de cara, y la mitad dan un resultado de cruz. Las propias historias, sin embargo, son alternativas totalmente independientes. No tiene sentido decir que diferentes movimientos de la moneda se refuerzan o se cancelan mutuamente. Todos son independientes.

Pero en mecánica cuántica las cosas son diferentes. Los caminos alternativos que puede seguir un electrón desde las dos rendijas al detector no son historias independientes. Las historias posibles se combinan para producir el resultado observado. Algunas trayectorias se refuerzan unas a otras, mientras que otras se cancelan. Tal interferencia cuántica entre las varias historias posibles es responsable de la pauta de bandas brillantes y oscuras en la pantalla

detectora. Así, *la diferencia reveladora entre las nociones* cuántica y clásica de probabilidad es que la primera está sujeta a interferencia y la segunda no.

La decoherencia es un fenómeno ampliamente extendido que forma un puente entre la física clásica de lo pequeño y la física clásica de lo no tan pequeño al suprimir la interferencia cuántica —es decir, al disminuir abruptamente la diferencia esencial entre las probabilidades cuántica y clásica—. La importancia de la coherencia fue comprendida ya en los primeros días de la teoría cuántica, pero su encarnación moderna data de un artículo inicial del físico alemán Dieter Zeh en 1970,[7.14] y desde entonces ha sido desarrollada por muchos investigadores, incluyendo a Erich Joos, también en Alemania, y Wojciech Zu- rek del Laboratorio Nacional de Los Álamos en Nuevo México.

Ésta es la idea. Cuando se aplica la ecuación de Schródinger en una situación sencilla, como el caso de fotones aislados que atraviesan una pantalla con dos rendijas, el resultado es la famosa figura de interferencia. Pero hay dos características muy especiales de este ejemplo de laboratorio que no son características de los sucesos del mundo real. En primer lugar, las cosas que encontramos en la vida del día a día son mayores y más complicadas que un simple fotón. En segundo lugar, las cosas que encontramos en las cosas del día a día, no están aisladas: interaccionan con nosotros y con el entorno. El libro que tiene ahora en las manos está sometido a contacto humano y, con más generalidad, está siendo golpeado continuamente por fotones y moléculas de aire. Además, puesto que el propio libro está hecho de muchas moléculas y átomos, estos constituyentes agitados están rebotando continuamente unos en otros. Lo mismo es cierto para los punteros de los aparatos de medida, para los gatos, para los cerebros humanos y para casi cualquier cosa que usted encuentra en

la vida diaria. A escalas astrofísicas, la Tierra, la Luna, los asteroides y los otros planetas están siendo bombardeados continuamente por fotones procedentes del Sol. Incluso un grano de polvo que flota en la oscuridad del espacio exterior está sujeto a golpes continuados de los fotones de microondas de baja energía que han estado recorriendo el espacio desde poco tiempo después del *big bang.* Y así, para entender lo que dice la mecánica cuántica sobre los sucesos del mundo real —frente a los experimentos prístinos de laboratorio— deberíamos aplicar las ecuación de Schródinger a estas situaciones más complejas y mezcladas.

En esencia, esto es lo que Zeh resaltó, y su trabajo, junto con el de muchos otros que lo han seguido, ha revelado algo totalmente maravilloso. Aunque fotones y moléculas de aire son demasiado pequeños para tener cualquier efecto significativo sobre el movimiento de un objeto grande como este libro o un gato, son capaces de hacer otra cosa. Continuamente «dan codazos» a la función de onda de los objetos grandes o, en la jerga física, perturban su coherencia: desordenan su secuencia ordenada de crestas seguidas de vientres seguidos de crestas. Esto es crucial, porque el ordenamiento de una función de onda es fundamental para generar efectos de interferencia (ver figura 4.2). Y así, de la misma forma que añadir aparatos de etiquetado al experimento de la doble rendija emborrona la función de onda resultante y con ello borra efectos de interferencia, el bombardeo constante de objetos por los constituyentes de su entorno también borra la posibilidad de fenómenos de interferencia. A su vez, una vez que la interferencia cuántica ya no es posible, las probabilidades intrínsecas en la mecánica cuántica son, para cualquier fin práctico, las probabilidades intrínsecas en lanzamientos de monedas y giros de ruleta. Una vez que la decoherencia

ambiental emborrona una función de onda, la naturaleza exótica de las probabilidades cuánticas se funde en las probabilidades más familiares de la vida cotidiana.[7.15] Esto sugiere una resolución del enigma de la medida cuántica, una solución que, si se diera, sería casi lo mejor que podríamos esperar. La describiré primero a la luz más optimista, y luego resaltaré lo que aún queda por hacer.

Si una función de onda de un electrón aislado muestra que tiene, digamos, un 50 por 100 de probabilidades de estar aquí y un 50 por 100 de probabilidades de estar allí, debemos interpretar estas probabilidades utilizando la consabida extrañeza de la mecánica cuántica. Puesto que ambas alternativas pueden revelarse al combinarse y generar una figura de interferencia, debemos considerarlas igualmente reales. En un lenguaje vago, hay un sentido en el que el electrón está en ambos lugares. ¿Qué sucede ahora si medimos la posición de un electrón con un instrumento de laboratorio no aislado y de tamaño cotidiano? Bien, en correspondencia con el ambiguo paradero del electrón, el puntero del instrumento tiene un 50 por 100 de probabilidades de apuntar a este valor y un 50 por 100 de probabilidades de apuntar a ese otro. Pero debido a la decoherencia, el puntero *no* estará en una mezcla fantasmagórica de apuntar a ambos valores; debido a la decoherencia, podemos interpretar estas probabilidades en el sentido usual, clásico y cotidiano. De la misma forma que una moneda lanzada tiene un 50 por 100 de probabilidades de salir cara y un 50 por 100 de probabilidades de salir cruz, pero sale o bien cara o bien cruz, también el puntero tiene un 50 por 100 de probabilidades de apuntar a este valor y un 50 por 100 de probabilidades de apuntar a ese otro valor, pero decididamente apunta a uno o al otro.

Un razonamiento similar se aplica a todos los demás objetos complejos y no aislados. Si un cálculo cuántico revela que un gato, situado en una caja cerrada, tiene un 50 por 100 de probabilidades de estar muerto y un 50 por 100 de probabilidades de estar vivo, porque hay un 50 por 100 de probabilidades de que un electrón incida en un mecanismo que somete al gato a gas venenoso y un 50 por 100 de probabilidades de que el electrón no incida en la trampa explosiva —la decoherencia sugiere que el gato no estará en un absurdo estado mezcla de estar a la vez vivo y muerto—. Aunque se han dedicado décadas de debate acalorado a preguntas como ¿qué significa que un gato esté a la vez vivo y muerto?, ¿cómo obliga el acto de abrir la caja y observar el gato a que éste escoja un estatus definido, muerto o vivo?, la decoherencia sugiere que mucho antes de que usted abra la caja el entorno ya ha completado miles de millones de observaciones que, casi instantáneamente, convirtieron todas las misteriosas probabilidades cuánticas en sus menos misteriosas contrapartidas clásicas. Mucho antes de que usted lo mire, el entorno ha obligado al gato a adoptar una condición única y definida. La decoherencia obliga a que buena parte de la ex- trañeza de la física cuántica se «escape» de un objeto grande puesto que, poco a poco, las innumerables partículas incidentes del entorno se llevan la extrañeza cuántica.

Es difícil imaginar una solución más satisfactoria al problema de la medida cuántica. Siendo más realista y abandonando la hipótesis simplificadora que ignora el entorno —una simplificación que era crucial para hacer progresos durante el desarrollo temprano del campo— encontraríamos que la mecánica cuántica tiene una solución incorporada. La conciencia humana, los experimentadores humanos y las observaciones humanas ya no desempeñarían un papel especial puesto que ellos

(¡nosotros!) serían simplemente elementos del entorno, como las moléculas de aire o los fotones, que pueden interaccionar con un sistema físico dado. Ya no habría una división fase uno/fase dos entre la evolución de los objetos y el experimentador que los mide. Todo —observado y observador— estaría en pie de igualdad. Todo —observado y observador— estaría sujeto exactamente a la misma ley mecanocuántica como se establece en la ecuación de Schródinger. El acto de medida ya no sería especial; sería simplemente un ejemplo concreto de contacto con el entorno.

¿Es así? ¿Resuelve la coherencia el problema de la medida cuántica? ¿Es la decoherencia responsable de que las funciones de onda cierren la puerta a todos salvo uno de los resultados potenciales a los que pueden conducir? Algunos así lo piensan. Investigadores como Robert Griffiths, de Camegie Mellon; Roland Omnés, de Orsay; el premio Nobel Murray Gell-Mann, del Instituto de Santa Fe, y Jim Hartle, de la Universidad de California en Santa Barbara han hecho grandes progresos y afirman que han desarrollado la decoherencia hasta dar un marco completo (llamado *historias decoherentes)* que resuelve el problema de la medida. Otros, como yo mismo, están intrigados pero aún no completamente convencidos. La virtud de la decoherencia es que elimina satisfactoriamente la barrera artificial que levantó Bohr entre los sistemas físicos grandes y pequeños, haciendo que todo esté sometido a las mismas fórmulas mecanocuánticas. Esto es un avance importante y pienso que Bohr lo hubiera encontrado satisfactorio. Aunque el no resuelto problema de la medida cuántica nunca disminuyó la capacidad de los físicos para reconciliar cálculos teóricos con datos experimentales, condujo a Bohr y sus colegas a articular un marco mecanocuántico con algunas características incómodas. A muchos les ponía

nerviosos la necesidad de utilizar palabras borrosas sobre el colapso de la función de onda o la noción imprecisa de sistemas «grandes» perteneciente al dominio de la física clásica. Al tener en cuenta la decoherencia los investigadores han hecho en gran medida innecesarias estas ideas vagas.

Sin embargo, una cuestión clave que pasé por alto en la descripción anterior es que, incluso si la decoherencia suprime la interferencia cuántica, y con ello hace que las extrañas probabilidades cuánticas sean como sus familiares contrapartidas clásicas, cada uno de los resultados potenciales encarnados en una función de onda sigue siendo susceptible de realización. Y por eso nos seguimos preguntando cómo «vence» un resultado y dónde «van» las muchas otras posibilidades cuando aquél sucede realmente. Cuando se arroja una moneda, la física clásica da una respuesta para la pregunta análoga. Dice que si examina cómo empieza a girar la moneda con la precisión adecuada, usted puede predecir, en principio, si caerá cara o caerá cruz. En un examen más detallado, un resultado está exactamente determinado por los detalles que usted pasó por alto inicialmente. No puede decirse lo mismo en física cuántica. La decoherencia permite que las probabilidades cuánticas sean interpretadas como las clásicas, pero no proporciona ningún detalle más fino que seleccione uno de los muchos resultados posibles para que suceda realmente.

Con un espíritu muy parecido al de Bohr, algunos físicos creen que buscar una explicación semejante de cómo surge un resultado único y definido es equivocada. Estos físicos argumentan que la mecánica cuántica, con su puesta al día para incluir decoherencia, es una teoría bien formulada cuyas predicciones explican el comportamiento de los aparatos de medida del laboratorio. Y, según esta idea, *ése* es el objetivo de la ciencia. Buscar una explicación de *lo que*

está pasando realmente, esforzarse en comprender *cómo puede salir un resultado concreto,* perseguir un nivel de *realidad más allá de las lecturas del detector y las impresiones del computador* revela una irrazonable avaricia intelectual.

Muchos otros, entre los que me incluyo, tienen una perspectiva diferente. La ciencia trata de explicar los datos. Pero muchos físicos creen que la ciencia trata también de abarcar las teorías que los datos confirman e ir más allá para obtener la máxima intuición sobre la naturaleza de la realidad. Tengo la fuerte sospecha de que se pueden ganar muchas ideas avanzando hacia una solución completa del problema de la medida.

Así pues, aunque hay un amplio acuerdo en que la decoherencia inducida por el entorno es una parte crucial de la estructura que llena la divisoria cuántico/clásico, y aunque muchos esperan que estas consideraciones convergerán un día en una conexión completa entre las dos, casi nadie está convencido de que el puente haya sido completamente construido.

La mecánica cuántica y la flecha del tiempo

De modo que ¿dónde estamos en el problema de la medida, y qué significa para la flecha del tiempo? Hablando en términos generales, hay dos clases de propuestas para vincular a la experiencia común con la realidad cuántica. En la primera clase (por ejemplo, la función de onda como conocimiento; los Muchos Mundos; la decoherencia), la ecuación de Schródinger es toda la historia; las propuestas ofrecen simplemente maneras diferentes de interpretar lo que significa la ecuación para la realidad física. En la segunda clase (por ejemplo, Bohm; Ghirardi-Rimini-Weber),

la ecuación de Schródinger debe complementarse con otras ecuaciones (en el caso de Bohm, una ecuación que muestra cómo una función de onda empuja a una partícula) o debe modificarse (en el caso Ghirardi-Rimini-Weber, para incorporar un mecanismo de colapso nuevo y explícito). Una pregunta clásica para determinar el impacto sobre la flecha del tiempo es si estas propuestas introducen una asimetría fundamental entre una dirección en el tiempo o la otra. Recordemos que la ecuación de Schródinger, igual que las de Newton, Maxwell y Einstein, trata hacia delante y hacia atrás en el tiempo en pie de igualdad. No proporciona ninguna flecha para la evolución temporal. ¿Cambia esto alguna de las propuestas?

En la primera clase de propuestas, el marco de Schródinger no se modifica en absoluto, de modo que se mantiene la simetría temporal. En la segunda clase, la simetría temporal puede sobrevivir o no, dependiendo de los detalles. Por ejemplo, en la aproximación de Bohm, la nueva ecuación propuesta trata el tiempo futuro y el tiempo pasado en pie de igualdad, y por lo tanto no se introduce ninguna asimetría. Sin embargo, la propuesta de Ghirardi-Rimini-Weber introduce un mecanismo de colapso que *sí* tiene una flecha temporal —una función de onda «no colapsante», una que va desde una forma puntiaguda a una forma extendida— que no estaba en las ecuaciones que se han modificado. Así pues, dependiendo de la propuesta, la mecánica cuántica, junto con una solución al enigma de la medida cuántica, puede o no puede seguir tratando igualmente cada dirección del tiempo. Consideremos las implicaciones de cada posibilidad.

Si la simetría temporal persiste (como sospecho que lo hará), todos los razonamientos y todas las conclusiones del último capítulo pueden trasladarse con pocos cambios al dominio cuántico. El núcleo de la física que entraba en

nuestra discusión de la flecha del tiempo era la simetría bajo inversión temporal de la física clásica. Aunque el lenguaje y el marco básico de la física cuántica difieren de los de la física clásica —funciones de onda en lugar de posiciones y velocidades; ecuación de Schródinger en lugar de leyes de Newton— la simetría bajo inversión temporal de todas las ecuaciones cuánticas aseguraría que el tratamiento de la flecha del tiempo no sufriría cambios. La entropía en el mundo cuántico puede definirse igual que en física clásica en tanto que describamos las partículas en términos de sus funciones de onda. Y la conclusión de que la entropía debería ir siempre en aumento —aumentando tanto hacia lo que llamamos el futuro como hacia lo que llamamos el pasado— seguiría siendo válida.

Llegaríamos así al mismo enigma que encontramos en el capítulo 6. Si tomamos como dadas nuestras observaciones del mundo ahora, como innegablemente reales, y si la entropía debería aumentar tanto hacia el futuro como hacia el pasado, ¿cómo explicamos cómo llegó a ser el mundo tal como es y cómo evolucionará posteriormente? Y se presentarían las mismas dos posibilidades: o bien todo lo que vemos nació repentinamente por un golpe de suerte estadístico que cabe esperar que suceda alguna vez en un universo eterno que pasa la inmensa mayoría del tiempo totalmente desordenado, o bien, por alguna razón, la entropía era asombrosamente baja justo después del *big bang* y durante los últimos catorce mil millones de años ha estado desenvolviéndose lentamente y seguirá haciéndolo hacia el futuro. Como en el capítulo 6, para evitar el atolladero de memorias, registros no fiables, y las leyes de la física nos centramos en la segunda opción —un *bang* de baja entropía— y buscamos una explicación a cómo y por qué las cosas empezaron en un estado tan especial.

Si, por el contrario, se pierde la simetría temporal —si la solución del problema de la medida que se acepte un día revela un tratamiento asimétrico fundamental de futuro *versus* pasado dentro de la mecánica cuántica— eso muy bien podría proporcionar la explicación más directa de la flecha del tiempo. Podría mostrar, por ejemplo, que los huevos se aplastan pero no se desaplastan porque, a diferencia de lo que encontramos utilizando las leyes de la física clásica, el aplastamiento resuelve las ecuaciones cuánticas pero el desaplastamiento no lo hace. Una película pasada al revés de un huevo aplastado mostraría entonces un movimiento que no podría suceder en el mundo real, lo que explicaría por qué nunca lo hemos visto. Y así sería.

Es posible. Pero si incluso esto parecería ofrecer una explicación muy diferente de la flecha del tiempo, quizá no sea en realidad tan diferente como parece. Como resaltamos en el capítulo 6, para que las páginas de *Guerra y paz* se hagan cada vez más desordenadas deben empezar ordenadas; para que un huevo se haga desordenado al aplastarse, debe empezar como un huevo prístino y ordenado; para que la entropía aumente hacia el futuro, la entropía debe ser baja en el pasado de modo que las cosas tengan la capacidad de hacerse desordenadas. Sin embargo, el simple hecho de que una ley trate el pasado y el futuro de forma diferente no asegura que la ley dicte un pasado con entropía más baja. La ley podría seguir implicando entropía más alta hacia el pasado (quizá la entropía aumentaría de forma asimétrica hacia el pasado y hacia el futuro), y es incluso posible que una ley con asimetría temporal fuera incapaz de decir algo sobre el pasado. Lo último es cierto en la propuesta de Ghirardi-Rimini-Weber, una de las únicas propuestas con asimetría temporal sustantiva en el mercado. Una vez que su mecanismo de colapso hace el truco, no hay forma de

deshacerlo —no hay manera de partir de la función colapsada y evolucionar de vuelta a su forma previa extendida—. La forma detallada de la función de onda se pierde en el colapso —se hace puntiaguda— y por ello es imposible «retrodecir» cómo eran las cosas en cualquier instante anterior a que ocurriera el colapso.

Así pues, incluso si una ley con asimetría temporal ofreciera una explicación parcial a por qué las cosas se despliegan en un orden temporal pero nunca en el orden inverso, podría muy bien apelar al mismo complemento clave requerido por las leyes con simetría temporal: una explicación de por qué la entropía era baja en el pasado lejano. Esto es cierto en las modificaciones con asimetría temporal para la mecánica cuántica que se han propuesto hasta ahora. Y por ello, a menos que algún descubrimiento futuro revele dos características, ambas de las cuales considero poco probable —una solución con asimetría temporal al problema de la medida cuántica que, adicionalmente, asegure que la entropía decrece hacia el pasado— nuestro esfuerzo para explicar la flecha del tiempo nos devuelve, una vez más, al origen del universo, el tema de la siguiente parte del libro.

Como esos capítulos dejarán claro, las consideraciones cosmológicas siguen su camino a través de muchos misterios en el corazón del espacio, el tiempo y la materia. De modo que en el viaje hacia las ideas de la cosmología moderna sobre la flecha del tiempo, vale la pena que no nos precipitemos a través del paisaje, sino que más bien, demos un paseo tranquilo a través de la historia cósmica.

TERCERA PARTE

Espacio tiempo y cosmología

8

De copos de nieve y el espaciotiempo

La simetría y la evolución del cosmos

Richard Feynman dijo en cierta ocasión que si él tuviera que resumir en una frase el descubrimiento más importante de la ciencia moderna elegiría «El mundo está hecho de átomos». Cuando reconocemos que buena parte de nuestra comprensión del universo se basa en las propiedades e interacciones de los átomos —desde la razón por la que las estrellas brillan y el cielo es azul a la explicación de por qué siente usted este libro en sus manos y ve estas palabras con sus ojos— podemos apreciar muy bien la elección de Feynman para resumir nuestro legado científico. Muchos de los científicos más destacados de hoy coinciden en que si se les permitiera una segunda frase escogerían «La simetría subyace a las leyes del universo». Durante los últimos siglos ha habido muchas transformaciones en la ciencia, pero los descubrimientos más duraderos tienen una característica común: han identificado características del mundo natural que permanecen invariables incluso cuando se les somete a un amplio abanico de manipulaciones. Estos atributos invariables reflejan lo que los físicos llaman simetrías, y han desempeñado un papel crucial creciente en muchos avances importantes. Esto ha proporcionado abundantes pruebas de que la simetría —en todos sus aspectos

misteriosos y sutiles— arroja una luz poderosa en la oscuridad donde la verdad espera a ser descubierta.

De hecho, veremos que la historia del universo es, en gran medida, la historia de la simetría. Los momentos más decisivos en la evolución del universo son aquellos en los que equilibrio y orden cambian repentinamente, dando escenarios cósmicos cualitativamente diferentes de los de eras precedentes. La teoría actual sostiene que el universo pasó por varias de estas transiciones durante sus primeros momentos y que *todo* lo que hemos encontrado alguna vez es un residuo tangible de una época cósmica anterior y más simétrica. Pero hay un sentido aún más amplio, un metasentido, en el que la simetría yace en el núcleo de un cosmos en evolución. El propio tiempo está íntimamente entrelazado con la simetría. Como se hará claro, la connotación práctica del tiempo como una medida de cambio, así como la existencia misma de un tipo de tiempo cósmico que nos permite hablar razonablemente de cosas como «la edad y evolución del universo en su conjunto», se basa sensiblemente en aspectos de la simetría. Y conforme los científicos han examinado dicha evolución, mirando atrás hacia el principio en busca de la verdadera naturaleza del espacio y el tiempo, la simetría se ha establecido como la más segura de las guías, una guía que ofrece ideas y respuestas que de otra forma hubiesen estado totalmente fuera de nuestro alcance.

La simetría y las leyes de la física

La simetría abunda. Sostenga una bola de billar en la mano y gírela en un sentido u otro —dele vueltas alrededor de cualquier eje— y parece exactamente igual. Coloque un plato llano sobre un mantel y gírelo en tomo a su centro:

parecerá totalmente inalterado. Coja suavemente un copo de nieve recién formado, gírelo de modo que cada punta pase a la posición que previamente tenía su vecina, y tendrá que esforzarse mucho para advertir que había hecho algo. Tome la letra «A», inviértala respecto a un eje vertical que pasa por su vértice, y tendrá una copia perfecta de la original.

Como estos ejemplos dejan claro, las simetrías de un objeto son las manipulaciones, reales o imaginarias, a las que puede ser sometido sin que tengan ningún efecto en su apariencia. Cuantos más tipos de manipulaciones pueda sufrir un objeto sin ningún efecto discemible, más simétrico es. Una esfera perfecta es altamente simétrica, puesto que cualquier rotación alrededor de su centro —utilizando un eje arriba- abajo, un eje izquierda-derecha, o de hecho cualquier eje— la deja con la misma apariencia exacta. Un cubo es menos simétrico, puesto que solamente las rotaciones en unidades de 90° alrededor de ejes que pasan por los centros de sus caras (y combinaciones de ellas) dejan su apariencia invariable. Por supuesto, si alguien realizara cualquier otra rotación, tal como la de la figura 8.1c, usted seguiría pu- diendo reconocer el cubo, pero también podría ver claramente que alguien lo había alterado. Por el contrario, las simetrías son como los merodeadores más hábiles; son manipulaciones que no dejan ninguna evidencia.

Todos éstos son ejemplos de simetrías de objetos en el espacio. Las simetrías subyacentes a las leyes de la física conocidas están estrechamente relacionadas con éstas, pero apuntan a una cuestión más abstracta: ¿qué manipulaciones —una vez más, reales o imaginadas— pueden realizarse sobre usted o sobre el entorno que no tengan absolutamente ningún efecto sobre las leyes que explican los fenómenos físicos que usted observa? Note que

para ser una simetría no se requiere que una manipulación de este tipo deje sus observaciones invariables. Ahora estamos interesados en si las leyes que gobiernan dichas observaciones —las leyes que explican lo que usted ve antes, y luego lo que ve después de alguna manipulación— son invariables. Como ésta es una idea fundamental, veámosla en acción en algunos ejemplos.

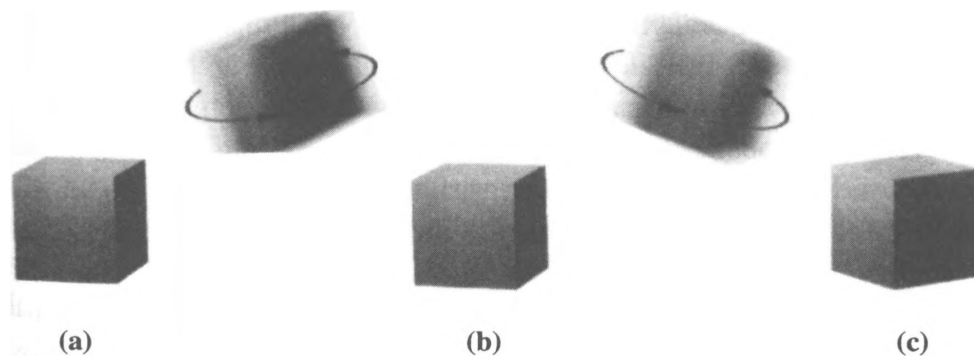


FIGURA 8.1. Si un cubo, como en (a) se rota 90°, o múltiplos de eso, alrededor de ejes que atraviesan cualquiera de sus caras, parece inalterado, como en **(b).** Pero cualquier otra rotación puede ser detectada, como en **(c).**

Imagine que usted es un gimnasta olímpico y que durante los últimos cuatro años se ha estado entrenando diligentemente en su centro gimnástico de Connecticut. Gracias a repeticiones aparentemente interminables, usted ha asimilado perfectamente sus movimientos rutinarios —usted sabe exactamente cómo soltar la barra fija para ejecutar un salto, hasta qué altura debe saltar en el ejercicio sobre el suelo para dar un doble giro, con qué rapidez debe balancearse en las paralelas para lanzar su cuerpo hacia una perfecta salida en doble salto mortal—. De hecho, su cuerpo ha asumido un sentido innato de las leyes de Newton, puesto que son estas mismas leyes las que gobiernan el movimiento de su cuerpo. Ahora, cuando usted

hace finalmente sus ejercicios delante de una audiencia abarrotada en la ciudad de Nueva York, donde se celebra la competición olímpica, usted se está basando en las mismas leyes, puesto que pretende realizar sus ejercicios exactamente como los hacía en la práctica. Todo lo que sabemos sobre las leyes de Newton da crédito a su estrategia. Las leyes de Newton no son específicas de un lugar u otro. No funcionan de una manera en Connecticut y de otra en Nueva York. Más bien creemos que dichas leyes funcionan exactamente de la misma manera independientemente de dónde esté usted. Incluso si ha cambiado de lugar, las leyes que gobiernan el movimiento de su cuerpo siguen tan inalteradas como la apariencia de una bola que ha sido rotada.

Esta simetría se conoce como *simetría de traslación* o *invariancia traslacional.* Se aplica no sólo a las leyes de Newton, sino también a las leyes del electromagnetismo de Maxwell, a las relatividades especial y general de Einstein, a la mecánica cuántica y a cualquier propuesta en la física moderna que alguien haya tomado en serio.

Nótese, no obstante, una cosa importante. Los detalles de sus observaciones y experiencias pueden variar y a veces lo hacen de un lugar a otro. Si usted realizase sus ejercicios gimnásticos en la Luna, descubriría que la trayectoria que seguía su cuerpo en respuesta a la misma fuerza impulsora de sus piernas era muy diferente. Pero entendemos plenamente esta diferencia particular y está ya integrada en las propias leyes. La Luna es menos masiva que la Tierra, de modo que ejerce menos atracción gravitatoria; como resultado, su cuerpo viaja a lo largo de trayectorias diferentes. Y este hecho —que la atracción gravitatoria de un cuerpo depende de su masa— es una parte integral de la ley de la gravedad de Newton (así como de la más refinada relatividad general de Einstein). La

diferencia entre sus experiencias terrestre y lunar no implica que la ley de la gravedad haya cambiado de un lugar a otro. Más bien, refleja simplemente una diferencia ambiental que la ley de la gravedad ya acomoda. De modo que cuando decíamos que las leyes de la física se aplican igualmente en Connecticut o en Nueva York —o, añadimos ahora, en la Luna— eso era cierto, pero tenga en cuenta que usted puede necesitar especificar diferencias ambientales de las que dependen las leyes. De todas formas, y ésta es la conclusión clave, el marco explicatorio que proporcionan las leyes no es alterado en absoluto por un cambio en la localización. Un cambio en la localización no requiere que los físicos vuelvan a la mesa de dibujo y lleguen a nuevas leyes.

Las leyes de la física no tenían por qué actuar de esta manera. Podemos imaginar un universo en que las leyes físicas sean tan mutables como las de los gobiernos nacionales y locales; podemos imaginar un universo en el que las leyes de la física con las que estamos familiarizados no nos digan nada sobre las leyes de la física en la Luna, en la galaxia Andrómeda, en la nebulosa del Cangrejo o en el otro extremo del universo. De hecho, no sabemos con absoluta certeza si las leyes que funcionan aquí son las mismas que funcionan en los confines remotos del cosmos. Pero sabemos que si las leyes cambiaran de algún modo ahí fuera, debe ser *muy* ahí fuera, porque observaciones astronómicas cada vez más precisas han proporcionado una prueba cada vez más convincente de que las leyes son uniformes en todo el espacio, al menos el espacio que podemos ver. Esto subraya el sorprendente poder de la simetría. Estamos ligados al planeta Tierra y su vecindad. Y, pese a todo, debido a la simetría de traslación podemos aprender sobre leyes fundamentales en acción en el

universo entero sin salir de casa, puesto que las leyes que descubrimos aquí *son* esas leyes.

La *simetría de rotación* o *invariancia rotacional* es prima hermana de la invariancia traslacional. Se basa en la idea de que cada dirección espacial está en pie de igualdad con cualquier otra. La visión desde la Tierra no le lleva ciertamente a esta conclusión.

Cuando usted mira arriba, ve cosas muy diferentes que cuando usted mira abajo. Pero, una vez más, esto refleja detalles del entorno; no es una característica de las propias leyes subyacentes. Si usted deja la Tierra y flota en el espacio profundo, lejos de cualquier estrella, galaxia u otro cuerpo celeste, la simetría se hace evidente: en el vacío oscuro no hay nada que distinga una dirección particular de otra. Todas están a la par. Usted no tendría que dedicar un momento de reflexión a si un laboratorio en el espacio profundo en el que usted se dispone a investigar las propiedades de la materia o de las fuerzas debería estar orientado en este sentido o en aquél, puesto que las leyes subyacentes son insensibles a esta elección. Si una noche algún travieso cambiara las posiciones de los giróscopos del laboratorio, haciéndole rotar varios grados alrededor de un eje particular, usted esperaría que esto no tenga ninguna consecuencia para las leyes de la física sondeadas por sus experimentos. Cada medida realizada confirma plenamente esta expectativa. Así pues, creemos que las leyes que gobiernan los experimentos que usted realiza y explican los resultados que encuentra son insensibles a su localización —simetría de traslación— y a su orientación en el espacio —simetría de rotación.[8.1]

Como discutimos en el capítulo 3, Galileo y otros eran perfectamente conscientes de otra simetría que deberían respetar las leyes de la física. Si su laboratorio en el espacio profundo se está moviendo a velocidad constante —

independientemente de si usted se está moviendo a 5 kilómetros por hora en esta dirección o a 100.000 kilómetros por hora en aquélla— el movimiento no debería tener absolutamente ningún efecto sobre las leyes que explican sus observaciones, porque usted tiene tanta razón como el vecino para afirmar que está en reposo y es todo lo demás lo que se está moviendo. Como hemos visto, Einstein amplió esta simetría de una forma completamente inesperada al incluir la velocidad de la luz entre las observaciones que no serían afectadas por su movimiento o el movimiento de la fuente luminosa. Ésta fue una jugada contundente porque normalmente arrojamos las particularidades de la velocidad de un objeto a la papelera de los detalles ambientales, reconociendo que la velocidad observada depende generalmente del movimiento del observador. Pero Einstein, viendo la simetría de la luz a través de las grietas en la fachada new- toniana de la Naturaleza, elevó la velocidad de la luz a la categoría de ley inviolable de la Naturaleza, declarándola inalterada por el movimiento como la bola de billar es inalterada por las rotaciones.

La relatividad general, el siguiente descubrimiento importante de Einstein, encaja perfectamente con esta marcha hacia teorías con simetría cada vez mayor. De la misma forma que usted puede pensar que la relatividad especial establece simetría entre todos los observadores que se mueven unos con respecto a otros a velocidad constante, puede considerar la relatividad general como algo que va un paso más allá y establece simetría también entre todos los puntos de vista acelerados. Esto es extraordinario porque, como hemos resaltado, aunque no se puede sentir el movimiento a velocidad constante, sí se puede sentir el movimiento acelerado. De modo que podría parecer que las leyes de la física que describen sus

observaciones deben ser diferentes cuando usted está acelerado, para explicar la fuerza adicional que usted siente. Tal es el caso con la aproximación de Newton; sus leyes, las que aparecen en todos los libros de texto de física de primer curso, deben ser modificadas si son utilizadas por un observador acelerado. Pero mediante el principio de equivalencia, discutido en el capítulo 3, Einstein se dio cuenta de que la fuerza que usted siente debido a la aceleración es indistinguible de la fuerza que siente en un campo gravitatorio de intensidad adecuada (cuanto mayor es la aceleración, mayor es el campo gravitatorio). Así pues, según la perspectiva más refinada de Einstein, las leyes de la física no cambian cuando usted acelera, siempre que incluya un campo gravitatorio en su descripción del entorno. La relatividad general trata por igual a todos los observadores —son completamente simétricos— incluso a los que se mueven a velocidades arbitrarias no constantes, puesto que cada uno puede afirmar que está en reposo atribuyendo las diferentes fuerzas sentidas al efecto de diferentes campos gravitatorios. Por lo tanto, la diferencia entre las observaciones de un observador acelerado y de otro no son más sorprendentes y no ofrecen mayor evidencia de un cambio en las leyes de la naturaleza que las diferencias que usted encuentra cuando realiza sus ejercicios gimnásticos en la Tierra o en la Luna.[8.2]

Estos ejemplos dan cierto sentido a por qué muchos consideran, y sospecho que Feynman hubiera estado de acuerdo, que las copiosas si-

metrías que subyacen a la ley natural presentan un segundo candidato frente a la hipótesis atómica como resumen de nuestras más profundas intuiciones científicas. Pero hay más en la historia. Durante las últimas décadas, los físicos han elevado los principios de simetría al más alto peldaño de la escala explicatoria. Cuando usted encuentra

una ley propuesta de la naturaleza, una pregunta natural es: ¿por qué esta ley?, ¿por qué la relatividad especial?, ¿por qué la relatividad general?, ¿por qué la teoría del electromagnetismo de Maxwell?, ¿por qué las teorías de Yang-Mills de las fuerzas nucleares fuerte y débil (que pronto veremos)? Una respuesta importante es que estas teorías hacen predicciones que han sido repetidamente confirmadas con experimentos precisos. Esto, por supuesto, es esencial para la confianza que tienen los físicos en las teorías, pero deja fuera algo importante.

Los físicos creen también que estas teorías están en la vía correcta porque, de algún modo difícil de describir, tienen el *presentimiento* de que son correctas, y las ideas de simetría son esenciales para esta sensación. Se presiente que es correcto que ningún lugar del universo es especial comparado con cualquier otro, de modo que los físicos tienen confianza en que la simetría de traslación debería estar entre las simetrías de las leyes de la naturaleza. Se presiente que es correcto que ningún movimiento particular a velocidad constante es especial comparado con cualquier otro, de modo que los físicos tienen confianza en que la relatividad especial, al abrazar plenamente la simetría entre todos los observadores con velocidad constante, es una parte esencial de las leyes de la naturaleza. Se presiente que es correcto, además, que cualquier punto de vista observacional —independientemente del movimiento posiblemente acelerado implicado— debería ser tan válido como cualquier otro, y por eso los físicos creen que la relatividad general, la teoría más simple que incorpora esta simetría, está entre las verdades profundas que gobiernan los fenómenos naturales. Y, como pronto veremos, las teorías de las tres fuerzas distintas de la gravedad —el electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil— están basadas en otros principios de la naturaleza

igualmente abstractos pero igualmente convincentes. Así que las simetrías de la naturaleza no son meramente consecuencias de las leyes de la naturaleza. Desde nuestra perspectiva moderna, las simetrías son la base de la que manan las leyes.

La simetría y el tiempo

Más allá de su papel en dar forma a las leyes que gobiernan las fuerzas de la Naturaleza, las ideas de simetría son vitales para el propio concepto de tiempo. Nadie ha encontrado todavía la definición fundamental y definitiva del tiempo pero, indudablemente, parte del papel del tiempo en la constitución del cosmos consiste en llevar la contabilidad del tiempo. Reconocemos que el tiempo ha transcurrido al advertir que las cosas ahora son diferentes de lo que eran entonces. La manecilla de la hora en su reloj apunta a un número diferente, el Sol está en una posición diferente en el cielo, las páginas de su copia desencuadernada de *Guerra y paz* están más desordenadas, el dióxido de carbono gaseoso que se escapa de su botella de Coca-Cola está más disperso —todo esto deja claro que las cosas han cambiado, y el tiempo es lo que ofrece el potencial para que se de tal cambio—. Parafraseando a John Wheeler, el tiempo es la manera que tiene la Naturaleza de impedir que todo —es decir, todo cambio— suceda a la vez.

La existencia del tiempo descansa así en la *ausencia* de una simetría particular: las cosas en el universo deben *cambiar* de un instante a otro para que siquiera definamos una noción de *momento a momento* que guarde cualquier parecido con nuestra idea intuitiva. Si hubiera simetría perfecta entre cómo son las cosas ahora y cómo eran antes, si el cambio de momento a momento no tuviese más

consecuencia que el cambio por girar una bola de billar, el tiempo tal como lo concebimos normalmente no existiría. [8.3] Esto no quiere decir que no existiría el intervalo espaciotiemporal, ilustrado esquemáticamente en la figura 5.1; podría hacerlo. Pero puesto que todo sería completamente uniforme a lo largo del eje temporal, no habría ningún sentido en el que el universo evolucione o cambie. El tiempo sería una característica abstracta de este escenario de la realidad —la cuarta dimensión del continuo espaciotemporal— pero de lo contrario, sería irreconocible.

De todas formas, incluso si la existencia del tiempo coincide con la falta de una simetría particular, su aplicación a escala cósmica requiere que el universo sea altamente respetuoso con una simetría diferente. La idea es simple y responde a una pregunta que quizá se le

haya ocurrido mientras leía el capítulo 3. Si la relatividad nos enseña que el paso del tiempo depende de con qué rapidez se mueve usted y del campo gravitatorio en el que resulta estar inmerso, ¿qué quiere decir cuando los astrónomos y los físicos hablan de que el universo entero esté en una edad definida particular —una edad que actualmente se considera que es de aproximadamente 14.000 millones de años—? ¿14.000 millones de años según quién? ¿14.000 millones de años de qué reloj? Si hubiera seres vivos en la lejana galaxia del Renacuajo ¿concluirían también que el universo tiene 14.000 millones de años, y si es así, qué hubiera asegurado que sus relojes han estado siempre en sincronía con los nuestros? La respuesta descansa en la simetría: la simetría en el espacio.

Si sus ojos pudieran ver la luz cuya longitud de onda es mucho mayor que la del naranja o el rojo, usted no sólo sería capaz de ver el interior de su homo microondas en actividad cuando presiona el botón de inicio; también vería un resplandor tenue y casi uniforme disperso a lo largo de lo

que el resto de nosotros percibimos como un cielo nocturno oscuro. Hace más de cuatro décadas los científicos descubrieron que el universo está lleno de radiación de microondas —luz de larga longitud de onda— que es una reliquia fría de las condiciones inmediatamente posteriores al *big bang*.**[8.4]** Esta *radiación cósmica de microondas* es perfectamente inocua. Al principio era extraordinariamente caliente, pero a medida que el universo evolucionó y se expandió, la radiación se diluyó y enfrió continuamente. Hoy es de tan sólo unos 2,7 grados por encima del cero absoluto, y el mayor daño que produce es su contribución de una pequeña fracción de la nieve que usted ve en su televisor cuando desconecta la antena y sintoniza una estación que no está emitiendo.

Pero este ruido débil ofrece a los astrónomos lo que los huesos de tiranosauro ofrecen a los paleontólogos: una ventana abierta a épocas anteriores que es crucial para reconstruir lo que sucedió en el pasado lejano. Una propiedad esencial de la radiación, revelada por medidas de precisión realizadas desde satélites durante la última década, es que es extraordinariamente uniforme. La temperatura de la radiación en una parte del cielo difiere de la temperatura en otra parte en menos de una milésima de grado. En la Tierra, una simetría semejante haría que la información del tiempo meteorológico no tuviera mucho interés. Si en Yakarta estuvieran a 30 grados, usted sabría inmediatamente que en Adelaida, Shanghai, Cheveland, Anchorage, y cualquier otro lugar para el caso, estarían a una temperatura entre 29,999 y 30,001 grados. A escala cósmica, por el contrario, la uniformidad de la temperatura de la radiación es *fantásticamente* interesante, pues suministra dos ideas críticas.

En primer lugar, proporciona evidencia observacional de que en sus fases más tempranas el universo no estaba

poblado por aglomeraciones de materia grandes y de alta entropía, tales como agujeros negros, puesto que tal entorno heterogéneo habría dejado una huella heterogénea en la radiación. Por el contrario, la uniformidad de la temperatura de la radiación pone de manifiesto que el universo joven era homogéneo; y, como vimos en el capítulo 6, cuando la gravedad cuenta —como lo hacía en el universo denso primitivo— la homogeneidad implica baja entropía. Eso es bueno, porque nuestra discusión de la flecha del tiempo se basaba firmemente en un comienzo del universo con baja entropía. Uno de nuestros objetivos en esta parte del libro es llegar tan lejos como podamos en la explicación de esta observación: queremos comprender cómo llegó a ser el entorno homogéneo, de baja entropía y altamente improbable del universo primitivo. Esto nos llevaría mucho más cerca de entender el origen de la flecha del tiempo.

En segundo lugar, aunque el universo ha estado evolucionando desde el *big bang,* la evolución debe haber sido en promedio casi idéntica en todo el cosmos. Para que la temperatura aquí y en la galaxia del Torbellino, y en el cúmulo Coma, y en cualquier otro lugar coincida hasta cuatro cifras decimales, las condiciones físicas en cada región del espacio deben haber evolucionado esencialmente de la misma manera desde el *big bang.* Ésta es una deducción importante, pero hay que interpretarla adecuadamente. Una mirada al cielo nocturno revela ciertamente un cosmos variado: planetas y estrellas de varios tipos están salpicados aquí y allá a lo largo del espacio. El punto importante, sin embargo, es que cuando analizamos la evolución del universo entero adoptamos una perspectiva macro que promedia estas variaciones a pequeña escala, y los promedios a gran escala parecen casi comple- lamente uniformes. Pensemos en un vaso de agua.

A la escala de las moléculas, el agua es extraordinariamente heterogénea: hay una molécula de H_2O aquí, un intervalo de espacio vacío, otra molécula de H_2O allí, y así sucesivamente. Pero si promediamos sobre la agrupación molecular a pequeña escala y examinamos el agua en las escalas «grandes» cotidianas podemos ver a simple vista que el agua del vaso parece perfectamente uniforme. La no uniformidad que vemos cuando miramos al cielo es como la visión microscópica desde una única molécula de H_2O. Pero como sucede con el vaso de agua, cuando el universo se examina a escalas suficientemente grandes —escalas del orden de cientos de millones de años luz— aparece extraordinariamente homogéneo. La uniformidad de la radiación es así un testimonio fosilizado de la uniformidad de las leyes de la física y de los detalles del entorno a lo largo del cosmos.

Esta conclusión es de gran trascendencia porque la uniformidad del universo es lo que nos permite definir un concepto de tiempo aplicable al universo en conjunto. Si consideramos que la medida de cambio es una definición activa del tiempo transcurrido, la uniformidad de las condiciones a lo largo del espacio es una prueba de la uniformidad del cambio a lo largo del cosmos, y con ello implica también la uniformidad del tiempo transcurrido. De la misma manera que la uniformidad de la estructura geológica de la Tierra permite a un geólogo en América, y a otro en África, y a otro en Asia estar de acuerdo en la historia y edad de la Tierra, la uniformidad de la evolución cósmica a lo largo del todo el espacio permite que un físico en la galaxia Andrómeda, otro en la Vía Láctea y otro en la galaxia del Renacuajo estén de acuerdo en la historia y edad del universo. En concreto, la evolución homogénea del universo significa que un reloj aquí, un reloj en la galaxia Andrómeda y un reloj en la galaxia del Renacuajo habrán

estado sometidos, en promedio, a condiciones físicas casi idénticas y con ello habrán marcado el tiempo aproximadamente de la misma manera. La homogeneidad del espacio proporciona así una sincronía universal.

Aunque hasta ahora he excluido detalles importantes (tales como la expansión del espacio, que se cubrirá en la próxima sección) la discusión subraya el núcleo de esta cuestión: el tiempo está en las encru-

cijadas de la simetría. Si el universo tuviera simetría temporal perfecta —si fuera completamente invariable— sería difícil siquiera definir lo que el tiempo significa. Por otra parte, si el universo no tuviera ninguna simetría en el espacio —si, por ejemplo, la radiación de fondo fuera completamente aleatoria, con temperaturas tremendamente diferentes en regiones diferentes— el tiempo en un sentido cosmológico tendría poco significado. Relojes en lugares diferentes marcarían el tiempo a ritmos diferentes, y por eso si usted preguntara cómo eran las cosas cuando el universo tenía 3.000 millones de años, la respuesta dependería de qué reloj estuviera mirando para ver que esos 3.000 millones de años habían transcurrido. *Eso* sería complicado. Por fortuna, nuestro universo no tiene tanta simetría como para dejar al tiempo sin significado, pero tiene suficiente simetría para que podamos evitar tales complejidades, lo que nos permite hablar de su edad global y su evolución global a través del tiempo.

Así que, dirijamos nuestra atención a dicha evolución y consideramos la historia del universo.

Estirando el tejido

La historia del universo parece un gran tema, pero en un esbozo a grandes pinceladas es sorprendentemente simple

y se basa en gran parte en un hecho esencial: el universo se está expandiendo. Puesto que éste es *el* elemento central en el desarrollo de la historia cósmica y, por supuesto, es uno de los descubrimientos más profundos de la Humanidad, examinemos brevemente cómo sabemos que es así.

En 1929, Edwin Hubble, utilizando el telescopio de 100 pulgadas en el observatorio del monte Palomar en Pasadena, California, encontró que el par de docenas de galaxias que pudo detectar se estaban alejando.[8.5] De hecho, Hubble encontró que cuanto más lejana está una galaxia, más rápida es su recesión. Para dar un sentido de escala, versiones más refinadas de las observaciones originales de Hubble (que han estudiado miles de galaxias utilizando, entre otros aparatos, el telescopio espacial Hubble) muestran que galaxias que están a 100 millones de años luz de nosotros se están alejando a aproximadamente 9

millones de kilómetros por hora, las que están a 200 millones de años luz se están alejando el doble de rápido, a aproximadamente 18 millones de kilómetros por hora, las que están a 300 millones de años luz de distancia se están alejando tres veces más rápido, a aproximadamente 27 millones de kilómetros por hora, y así sucesivamente. El descubrimiento de Hubble supuso una conmoción porque el prejuicio filosófico y científico sostenía que el universo era, en las escalas más grandes, estático, eterno, fijo e invariable. Pero de un golpe, Hubble hizo añicos esa idea. Y en una maravillosa confluencia de experimento y teoría, la relatividad general de Einstein fue capaz de ofrecer una bella explicación del experimento de Hubble.

En realidad, quizá usted piense que dar con una explicación no fuera particularmente difícil. Después de todo, si usted pasara por una fábrica y viera todo tipo de

materiales que salen violentamente expulsados en todas direcciones, probablemente pensaría que se había producido una explosión. Y si usted retrocediera a lo largo de las trayectorias seguidas por los trozos de metal y pedazos de hormigón, encontraría que todas convergían en un lugar que probablemente sería un recipiente en donde ocurrió la explosión. Por el mismo razonamiento, puesto que la vista desde la Tierra —como atestiguan las observaciones de Hubble y posteriores— muestra que las galaxias se están alejando, usted podría pensar que nuestra posición en el espacio era el lugar de una antigua explosión que escupió uniformemente el material en bruto de estrellas y galaxias. El problema con esta teoría, sin embargo, es que discrimina una región del espacio —la nuestra— como región singular al hacerla el lugar de nacimiento del universo. Y si fuera así, implicaría una asimetría profundamente asentada: las condiciones físicas en regiones alejadas de la explosión primordial —lejos de nosotros— serían muy diferentes de las de aquí. Puesto que no hay evidencia de dicha asimetría en los datos astronómicos, y además, puesto que recelamos mucho de las explicaciones antropocéntricas unidas al pensamiento precopemicano, buscamos una interpretación más sofisticada del descubrimiento de Hubble, una en la que nuestra posición en el espacio no ocupe un lugar especial en el orden cósmico.

La relatividad general ofrece esa explicación. Con la relatividad general, Einstein encontró que el espacio y el tiempo son flexibles, y

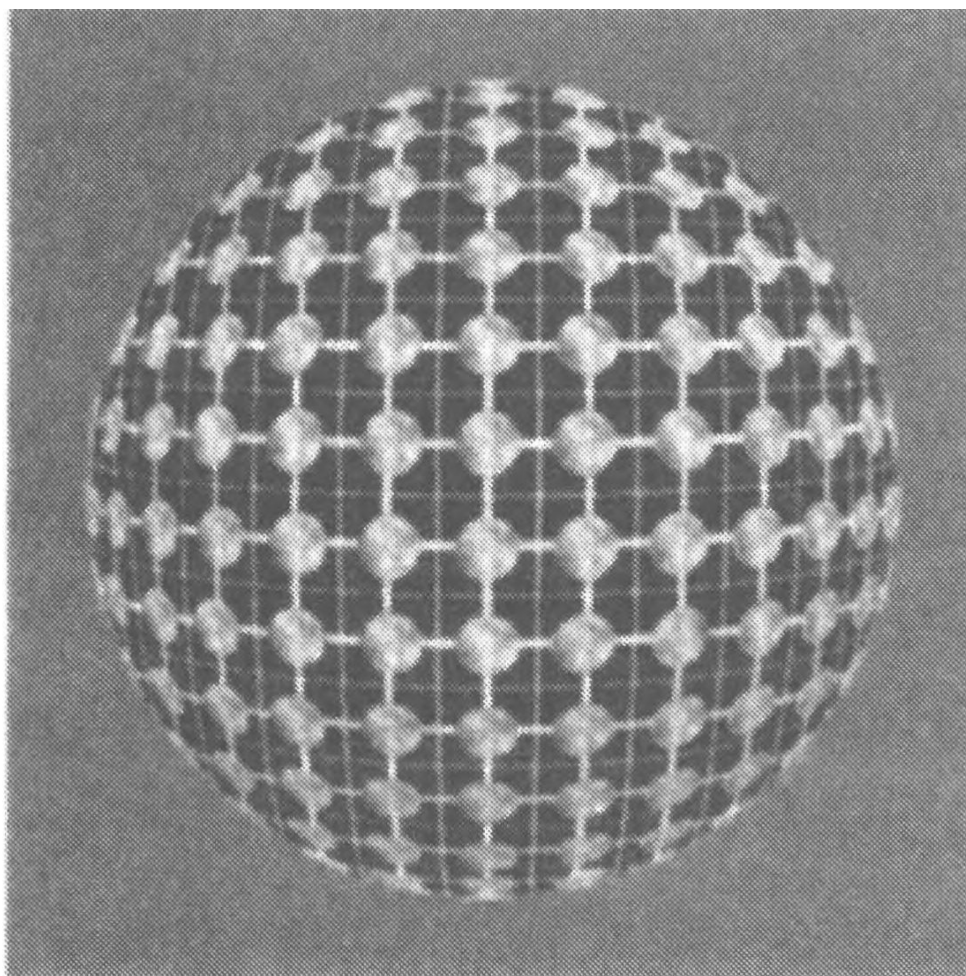
no fijos, elásticos, y no rígidos; y él ofreció explicaciones que nos dicen precisamente cómo responden el espacio y el tiempo a la presencia de materia y energía. En la década de 1920 el matemático y meteorólogo ruso Alexander Friedmann e, independientemente, el sacerdote y astrónomo belga Georges Lemaítre, analizaron las

ecuaciones de Einstein cuando se aplican al universo entero, y los dos encontraron algo sorprendente. De la misma manera que la atracción gravitatoria de la Tierra implica que una pelota de béisbol que sale por encima del catcher debe estar dirigida o bien hacia arriba o bien hacia abajo pero evidentemente no puede estar estática (excepto en el único momento en que alcanza su punto más alto), Friedmann y Lemaître se dieron cuenta de que la atracción gravitatoria de la materia y la radiación dispersas por el cosmos entero implica que el tejido del espacio debe estar estirándose o contrayéndose pero que no podría mantener un tamaño fijo. De hecho, éste es uno de los raros ejemplos en los que la metáfora no sólo capta la esencia de la física sino también su contenido matemático, puesto que las ecuaciones que gobiernan la altura de la pelota de béisbol sobre el suelo son casi idénticas a las ecuaciones de Einstein que gobiernan el tamaño del universo.[8.6]

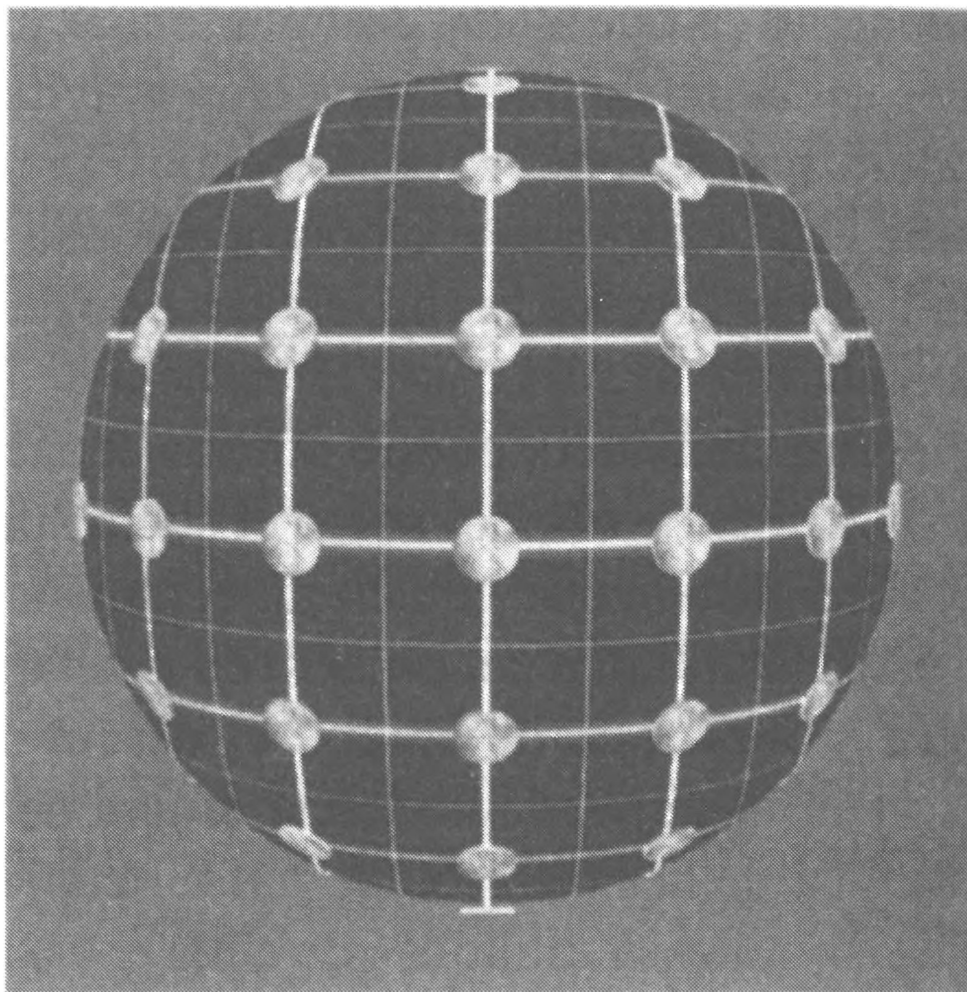
La flexibilidad del espacio en la relatividad general ofrece una manera profunda de interpretar el descubrimiento de Hubble. Más que explicar el movimiento hacia afuera de las galaxias por una versión cósmica de la explosión de la fábrica, la relatividad general dice que durante miles de millones de años el espacio se ha estado estirando. Y a medida que se hinchaba, el espacio ha arrastrado a las galaxias alejándolas unas de otras como se alejan las pasas en un pudin cuando la masa crece al hornear. Así pues, el origen del movimiento hacia afuera surge de este implacable hinchamiento del propio espacio.

Para captar mejor esta idea, consideremos también el extraordinariamente útil modelo del globo para la expansión del universo al que a menudo acuden los físicos (una analogía que puede rastrearse al menos hasta el chiste gráfico, que puede ver usted en las notas finales, que apareció en un periódico holandés en 1930 tras una

entrevista con Willem de Sitter, un científico que hizo contribuciones fundamentales a la cosmología).[8.7] Esta analogía asemeja nuestro espacio tridimensional a la superficie bidimensional más fácil de visualizar de un globo esférico, como en la figura 8.2a, que está hinchándose y alcanzando un tamaño cada vez mayor. Las galaxias están representadas por numerosas monedas de un centavo, con la efigie de Lincoln, uniformemente espaciadas pegadas a la superficie del globo. Note que conforme se expande el globo, las monedas se alejan unas de otras, lo que ofrece una sencilla analogía de cómo el espacio en expansión hace que las galaxias se separen.



(a)



(b)

FIGURA 8.2. **(a)** Si se pegan monedas de centavo igualmente espaciadas a la superficie de una esfera, la vista que ve cada Lincoln es la misma que la que ve cualquier otro. Esto concuerda con la creencia de que la vista que se ve desde cualquier galaxia en el universo es, en promedio, la misma que la que se ve desde cualquier otra, (b) Si la esfera se expande, las distancias entre todas las monedas aumentan. Además, cuanto más separadas están dos monedas en 8.2a, mayor es la separación que experimentan por la expansión en 8.2b. Esto concuerda con nuestras medidas que muestran que cuanto más alejada está una galaxia de un punto de vista dado, más rápidamente se aleja de dicho punto. Nótese que ninguna moneda se distingue como especial, también en consonancia con nuestra creencia de que ninguna galaxia en el universo es especial o el centro de expansión del espacio.

Una característica importante de este modelo es que hay completa simetría entre las monedas, puesto que lo que ve cualquier Lincoln particular es lo mismo que ve cualquier otro Lincoln. Para representarlo, imagine que usted se contrae hasta el tamaño de una moneda y mira en todas direcciones a lo largo de la superficie del globo (recuerde, en esta analogía la superficie del globo representa todo el espacio, de modo que mirar fuera de la superficie del globo no tiene significado)- ¿Qué observará usted? Bien, usted verá monedas que se alejan en todas direcciones a medida que el globo se expande. Y si está en una moneda diferente ¿qué observará? La simetría asegura que usted verá lo mismo: monedas que se alejan en todas direcciones. Esta imagen tangible capta bien nuestra creencia —apoyada por exámenes astronómicos cada vez más precisos— que un observador en cualquiera de los más de cien mil millones de galaxias del universo, contemplando su cielo nocturno con un potente telescopio, vería en promedio una imagen similar a la que vemos nosotros: galaxias que nos rodean alejándose en todas direcciones.

Y así, a diferencia de la explosión en una fábrica dentro de un espacio fijo y preexistente, si el movimiento hacia fuera es debido a que el espacio se está estirando no hay necesidad de ningún punto especial —ninguna moneda especial, ninguna galaxia especial— que sea el centro del movimiento hacia afuera. Cada punto —cada moneda, cada galaxia— es exactamente igual que cualquier otro. La vista desde cualquier lugar *parece* igual que la vista desde el centro de una explosión: cada Lincoln ve a todos los demás Lincoln alejándose; un observador, como nosotros, en cualquier galaxia ve a todas las demás galaxias alejándose. Pero puesto que esto es cierto para todos los lugares, no hay ningún lugar único o especial que sea *el* centro del que emana el movimiento hacia afuera.

Además, esta explicación no sólo da cuenta cualitativamente del movimiento hacia fuera de las galaxias de una manera que es espacialmente homogénea, sino que también explica los detalles cuantitativos encontrados por Hubble y confirmados con mayor precisión por observaciones posteriores. Como se ilustra en la figura 8.2b, si el globo se hincha durante algún intervalo de tiempo, duplicando su tamaño por ejemplo, todas las separaciones espaciales duplicarán también su tamaño: monedas que estaban a 1 centímetro estarán ahora a 2 centímetros, monedas que estaban a 2 centímetros estarán ahora a 4 centímetros, monedas que estaban a 3 centímetros estarán ahora a 6 centímetros, y así sucesivamente. Así pues, en cualquier intervalo de tiempo dado el incremento de la separación entre dos monedas es proporcional a la distancia inicial entre ellas. Y puesto que un mayor incremento en la separación durante un intervalo de tiempo dado significa una velocidad mayor, monedas que están más lejanas una de otra se separan más rápidamente. En esencia, cuanto más alejadas estén dos monedas, más superficie de globo hay entre ellas, y por eso más rápidamente son empujadas cuando se hincha. Aplicando exactamente el mismo razonamiento al espacio en expansión y a las galaxias que contiene, obtenemos una explicación de las observaciones de Hubble. Cuanto más apartadas están dos galaxias, más espacio hay entre ellas, de modo que más rápidamente son alejadas una de otía cuando el espacio se hincha.

Atribuyendo el movimiento observado de las galaxias al hincha- miento del espacio, la relatividad general proporciona una explicación que no sólo trata simétricamente a todos los lugares del espacio sino que también da cuenta de todos los datos de Hubble de un plumazo. Una explicación de este tipo, una explicación que sale elegantemente de su caja (que realmente *utiliza* la

«caja» —esto es, el espacio—) para explicar las observaciones con precisión cuantitativa y simetría artística, es para los físicos algo demasiado bello para ser falso. Hay esencialmente un acuerdo universal en que el tejido del espacio se está estirando.

El tiempo en un universo en expansión

Utilizando una ligera variante del modelo del globo, podemos entender ahora más exactamente cómo la simetría en el espacio, incluso si el espacio se está expandiendo, da una noción de tiempo que se aplica uniformemente en todo el cosmos. Imagine que se reemplaza cada moneda por un reloj idéntico, como en la figura 8.3. Sabemos por la relatividad que los relojes idénticos marcarán el tiempo a ritmos diferentes si están sujetos a influencia físicas diferentes —movimientos diferentes o campos gravitatorios diferentes—. Pero la observación simple, y pese a ello clave, es que la simetría completa entre todos los Lincolns en el globo que se infla se traduce en una simetría completa entre todos los relojes. Todos los relojes experimentan condiciones físicas idénticas, de modo que todos marchan exactamente al mismo ritmo y registran cantidades idénticas de tiempo transcurrido. Análogamente, en un universo en expansión en el que hay un alto grado de simetría entre todas las galaxias, *los relojes que se mueven junto con una u otra galaxia también marcan el mismo ritmo y por ello registran una cantidad idéntica de tiempo transcurrido.* ¿Cómo podría ser de otra manera? Cada reloj está a la par con cualquier otro, habiendo experimentado, en promedio, condiciones físicas casi idénticas. Esto muestra de nuevo el contundente poder de la simetría. Sin ningún cálculo o análisis detallado, nos

damos cuenta de que la uniformidad del entorno físico, tal como pone de manifiesto la uniformidad de radiación de fondo de microondas y la distribución uniforme de las galaxias en el espacio,[8.8] nos permite inferir la uniformidad del tiempo.

Aunque el razonamiento aquí es directo, la conclusión puede ser confusa. Puesto que todas las galaxias se están alejando a medida que el espacio se expande, los relojes que se mueven junto con una u otra galaxia también se están alejando. Y lo que es más, se están moviendo unos con respecto a otros con una gran variedad de velocidades determinadas por la enorme variedad de las distancias entre ellos. ¿No hace este movimiento que los relojes pierdan sincronización como nos enseñó Einstein con la relatividad especial? Por varias razones, la respuesta es no; hay una manera particularmente útil de considerarlo.

Recordemos del capítulo 3 que Einstein descubrió que los relojes que se mueven *a través* del espacio de maneras diferentes marcan el tiempo a ritmos diferentes (porque desvían diferentes cantidades de su movimiento a través del tiempo a movimiento a través del espacio; recordemos la analogía con Bart y su monopatín, dirigiéndose primero al norte y desviando luego algo de su movimiento hacia el este). Pero los relojes que estamos discutiendo ahora no se están moviendo a través del espacio. Del mismo modo que cada moneda está pegada a un punto en el globo y sólo se mueve con respecto a las otras monedas debido al hinchamiento de la superficie del globo, cada galaxia ocupa una región del espacio y sólo se mueve con relación a otras galaxias debido básicamente a la expansión del espacio. Y esto significa que, con respecto al propio espacio, todos los relojes están realmente en reposo, de modo que marcan el tiempo de forma idéntica. Son precisamente estos relojes —*relojes cuyo único movimiento procede de la expansión del*

espacio— los que proporcionan los relojes cósmicos sincronizados utilizados para medir la edad del universo.

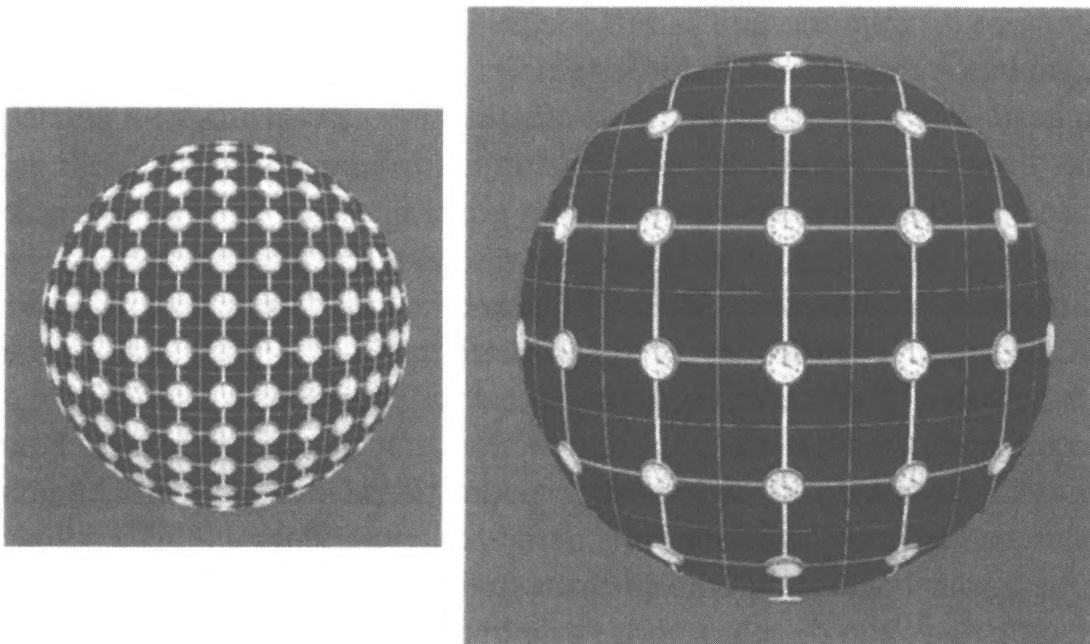


FIGURA 8.3. Los relojes que se mueven junto con las galaxias —cuyo movimiento, en promedio, se debe sólo a la expansión del espacio— proporcionan cronómetros cósmicos universales. Permanecen sincronizados incluso si se separan uno de otro, puesto que se mueven *con* el espacio pero no *a través* del espacio.

Note, por supuesto, que usted es libre para tomar su reloj, subir a bordo de un cohete y lanzarse en esta dirección o ésa a través del espacio a enormes velocidades, experimentando un movimiento que supera de forma significativa el flujo cósmico de la expansión espacial. Si lo hace, su reloj *marchará* a un ritmo diferente y usted *encontrará* una longitud diferente de tiempo transcurrido desde el *bang.* Este es un punto de vista perfectamente válido, pero es completamente individualista: el tiempo transcurrido medido está unido a la historia de sus paraderos y estados de movimiento particulares. Sin

embargo, cuando los astrónomos hablan de la edad del universo están buscando algo universal —están buscando una medida que tenga el mismo significado en todas partes. La uniformidad del cambio a través del espacio proporciona una manera de hacerlo.[8.9]

De hecho, la uniformidad de la radiación de fondo de microondas proporciona un test a medida para saber si usted se está moviendo realmente con el flujo cósmico del espacio. Aunque la radiación de microondas es homogénea en el espacio, si usted emprende un movimiento adicional al del flujo cósmico de la expansión espacial ya no observará que la radiación sea homogénea. De la misma forma que la bocina de un automóvil veloz tiene un tono más alto cuando se acerca que cuando se aleja, si usted va lanzado en una nave espacial, las crestas y vientres de las microondas que llegan de frente a su nave incidirán con una frecuencia más alta que las microondas que le llegan desde atrás. Microondas de frecuencia más alta se traducen en temperatura más alta, de modo que usted encontraría que la radiación en la dirección a la que usted se dirige es un poco más caliente que la radiación que le llega por detrás. Y el caso es que aquí, en la «nave espacial Tierra», los astrónomos encuentran que el fondo de microondas es un poco más caliente en una dirección del espacio y un poco más frío en la dirección opuesta. La razón es que la Tierra no sólo se mueve alrededor del Sol, y el Sol se mueve alrededor del centro galáctico, sino que la Vía Láctea entera tiene una pequeña velocidad, además de la debida a la expansión cósmica, dirigida hacia la constelación de la Hidra. Una vez que los astrónomos corrigen el efecto que estos movimientos adicionales relativamente pequeños tienen sobre las microondas que recibimos, la radiación muestra la exquisita uniformidad de temperatura entre una parte del cielo y otra. Es esta uniformidad, esta simetría

general entre una localización y otra, la que nos permite hablar razonablemente del tiempo cuando describimos el universo entero.

Características sutiles de un universo en expansión

Unos pocos puntos sutiles en nuestra explicación de la expansión cósmica son dignos de señalar. En primer lugar, recordemos que en la metáfora del globo es sólo la *superficie* del globo la que desem-

peña un papel —una superficie que es sólo bidimensional (cada lugar puede especificarse dando dos números análogos a la latitud y la longitud en la Tierra), mientras que el espacio que vemos cuando miramos a nuestro alrededor tiene tres dimensiones. Utilizamos este modelo de menos dimensiones porque retiene los conceptos esenciales para la verdadera historia tridimensional pero es mucho más fácil de visualizar. Es importante que tenga esto en cuenta, especialmente si ha estado tentado a decir que hay un punto especial en el modelo del globo: el punto central en el interior del globo del cual se está alejando la superficie elástica entera. Aunque esta observación es cierta, la analogía del globo deja aquí de ser válida porque cualquier punto que no está en la superficie del balón no desempeña ningún papel. La superficie del globo representa *todo* el espacio; puntos que no están en la superficie del globo son simplemente subproductos irrelevantes de la analogía y no corresponden a ningún lugar en el universo.[*19]

En segundo lugar, si la velocidad de recesión es cada vez mayor para las galaxias que están cada vez más lejos, ¿no significa eso que las galaxias que están suficientemente distantes se alejan de nosotros a una velocidad mayor que la velocidad de la luz? La respuesta es un sí rotundo y

definitivo, pero esto no está en conflicto con la relatividad especial. ¿Por qué? Bien, está íntimamente relacionado con la razón por la que los relojes que se separan debido al flujo cósmico del espacio siguen estando sincronizados. Como resaltamos en el capítulo 3, Einstein demostró que nada puede moverse a través del espacio más rápido que la luz. Pero las galaxias, en promedio, apenas se mueven a través del espacio. Su movimiento es debido casi por completo al *estiramiento del propio espacio.* Y la teoría de Einstein no prohíbe que el espacio se expanda de una manera que arrastre a dos puntos —dos galaxias— alejándolos uno de otro a velocidad mayor que la de la luz. Sus resultados sólo limitan las velocidades de las que se ha sustraído el movimiento de la expansión espacial. Las observaciones confirman que para galaxias típicas que se mueven con el flujo cósmico, tal movimiento en exceso es mínimo, en completa consonancia con la relatividad especial, incluso si su movimiento con respecto a cada una de las demás, debido al hinchamiento del propio espacio, puede superar la velocidad de la luz. [*20]

En tercer lugar, si el espacio se está expandiendo, ¿no significaría eso que además de que las galaxias se separan unas de otras, el hinchamiento del espacio dentro de cada galaxia haría que todas sus estrellas se separen, y el hinchamiento del espacio dentro de cada estrella, y dentro de cada planeta, y dentro de usted y de mí y dentro de cualquier otra cosa, haría que se alejaran todos los átomos constituyentes, y el hinchamiento del espacio dentro de cada átomo haría que se alejaran todos los constituyentes subatómicos? En resumen, ¿no haría el hinchamiento del espacio que todo *crezca* en tamaño, incluyendo nuestras varas de medir, y de esa manera haría imposible discernir que hubiera ocurrido realmente una expansión? Respuesta: no. Piense de nuevo en el modelo del globo y las monedas.

A medida que se hincha la superficie del globo, todas las monedas se separan, pero las monedas mismas no se expanden. Si hubiéramos representado las galaxias por círculos pequeños dibujados en el globo con un rotulador negro, entonces a medida que el globo creciera en tamaño también crecerían los círculos pequeños. Pero son las monedas, no los círculos negros, las que captan lo que realmente sucede. Cada moneda mantiene su tamaño fijo porque las fuerzas que mantienen juntos sus átomos de cobre y cinc son mucho más intensas que el tirón hacia afuera del globo en expansión en la que están pegadas. Análogamente, la fuerza nuclear que mantiene unidos los átomos individuales, y la fuerza electromagnética que mantiene unidos sus huesos y su piel, y la fuerza gravitatoria que mantiene unidos a los planetas y las estrellas en las galaxias, son más intensas que la expansión hacia afuera del espacio, y por ello ninguno de estos objetos se expande. Sólo en las escalas mayores, en escalas mucho mayores que las galaxias individuales, el hinchamiento del espacio encuentra poca o ninguna resistencia (la atracción gravitatoria entre galaxias ampliamente separadas es relativamente pequeña, debido a las grandes separaciones implicadas) y por eso sólo en tales escalas supergalácticas el hinchamiento del espacio aparta los objetos.

Cosmología, simetría y la forma del espacio

Si alguien le despertara de un profundo sueño en mitad de la noche y le pidiera que le dijera la forma del universo —la forma global del espacio— difícilmente podría dar una respuesta. Incluso en su estado de aturdimiento, usted sabe que Einstein demostró que el espacio es algo parecido a la Silly Putty[*21] y por ello, en principio, puede tomar

prácticamente cualquier forma. ¿Cómo puede usted responder entonces a la pregunta de su interrogador? Vivimos en un pequeño planeta en órbita en tomo a una estrella en las afueras de una galaxia que no sino una entre los cientos de miles de millones dispersas en el espacio, de modo que ¿cómo diantres puede esperarse que usted sepa algo sobre la forma del universo entero? Bien, cuando las nieblas del sueño empiezan a disiparse, usted se da cuenta poco a poco de que el poder de la simetría llega una vez más en su ayuda.

Si tiene en cuenta la creencia ampliamente sostenida por los científicos de que sobre promedios a gran escala todos los lugares y todas las direcciones en el universo están simétricamente relacionados, entonces usted está en buen camino para responder a la pregunta del interrogador. La razón es que casi todas las formas dejan de satisfacer este criterio de simetría, porque una parte o una región de la forma difiere fundamentalmente de otra. Una pera es más ancha en su parte inferior y menos en la superior; un huevo es más plano en el centro pero más puntiagudo en sus extremos. Estas formas, aunque muestran cierto grado de simetría, no poseen simetría completa. Descartando tales formas, y limitándose sólo a aquellas en que toda región y dirección es como cualquier otra, usted es capaz de reducir fantásticamente las posibilidades.

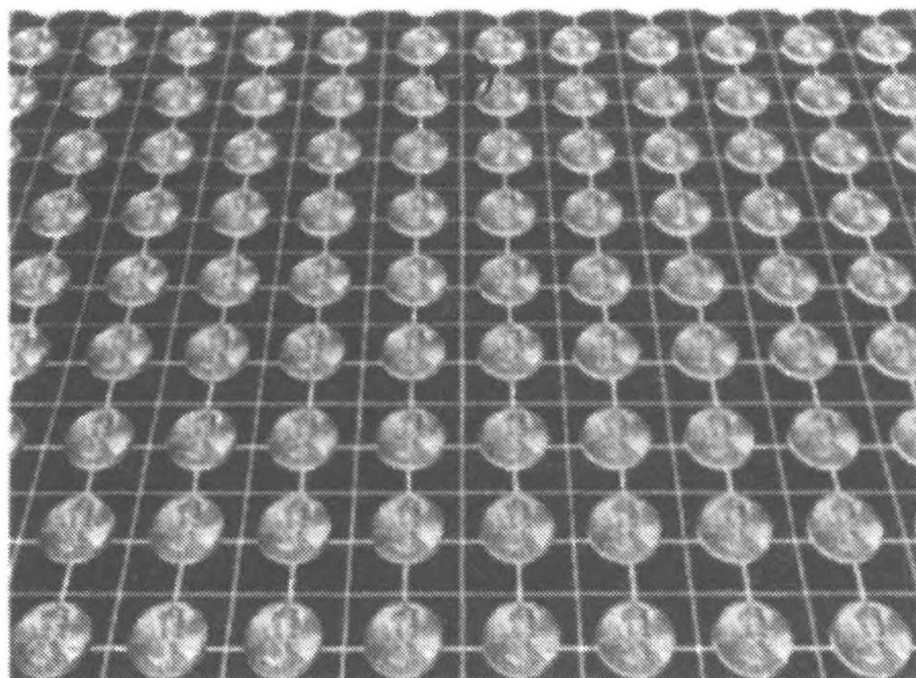
Ya hemos tropezado con una forma que satisface el requisito. La forma esférica del globo era el ingrediente clave al establecer la simetría entre todos los Lincolns en su superficie hinchada, y por eso la versión tridimensional de esta forma, la denominada *tres-esfera,* es un candidato para la forma del espacio. Pero ésta no es la única forma que da simetría completa. Siguiendo el razonamiento con los modelos bi- dimensionales más fácilmente visualizados, imagine una lámina elástica *infinitamente* ancha e

infinitamente larga —una lámina que está completamente recta— con monedas uniformemente espaciadas pegadas a su superficie. Conforme se expande la lámina entera, hay una vez más simetría espacial completa y compatibilidad completa con el descubrimiento de Hubble: cualquier Lincoln ve a cualquier otro Lincoln alejarse con una velocidad proporcional a su distancia, como en la figura 8.4. Así, una versión tridimensional de esta forma como un cubo infinito en expansión de goma transparente con galaxias uniformemente salpicadas por su interior es otra forma posible para el espacio. (Si usted prefiere metáforas culinarias, piense en una versión infinitamente grande del pudin de pasas mencionado antes, una que tiene la forma de un cubo pero que se prolonga indefinidamente, con pasas que desempeñan el papel de galaxias. Cuando el pudin se hornea, la masa se expande, haciendo que cada pasa se aleje de las demás.) Esta

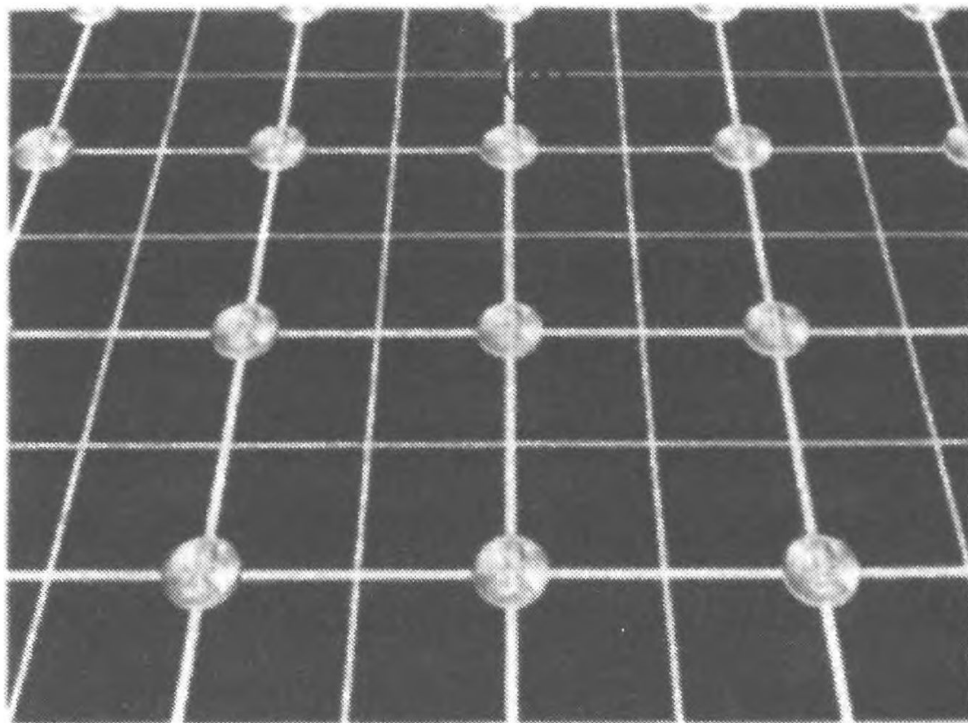
forma se denomina *espacio plano* porque, a diferencia del ejemplo esférico, no tiene curvatura (un significado de «plano» que utilizan los matemáticos y los físicos pero que difiere del significado coloquial de «en forma de pastel»). **[8.11]**

Una cosa bonita sobre las formas esférica y plana infinita es que usted puede caminar interminablemente y no llegar nunca a un borde o una frontera. Esto es atractivo porque nos permite evitar cuestiones espinosas: ¿qué hay más allá del borde del espacio?, ¿qué sucede si usted camina hasta una frontera del espacio? Si el espacio no tiene bordes ni fronteras, la pregunta no tiene significado. Pero notemos que las dos formas realizan esta característica atractiva de diferentes maneras. Si usted camina en línea recta en un espacio de forma esférica, encontrará, como la expedición de Magallanes, que más pronto o más tarde volverá a su punto de partida, sin haber encontrado nunca un borde. Por

el contrario, si usted camina en línea recta en un espacio plano infinito, encontrará que como el conejito de Energizer, puede seguir y seguir, sin encontrar nunca un borde, pero también sin volver nunca al lugar donde empezó su viaje. Aunque esto podría parecer una diferencia fundamental entre la geometría de una forma curva y una plana, hay una simple variante del espacio plano que sorprendentemente se parece a la esfera a este respecto.

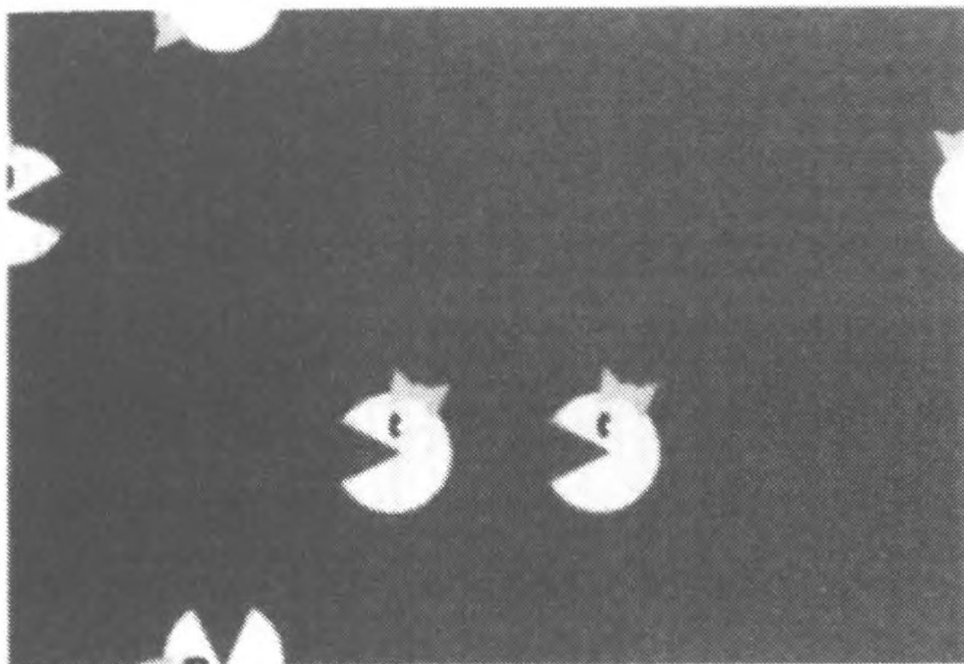


(a)



(b)

FIGURA 8.4. **(a)** La vista desde cualquier moneda en un plano infinito es la misma que la vista desde cualquier otra, (b) Cuanto más alejadas están dos monedas en la figura 8.4a, mayor es el aumento en su separación cuando el plano se expande.



(a)

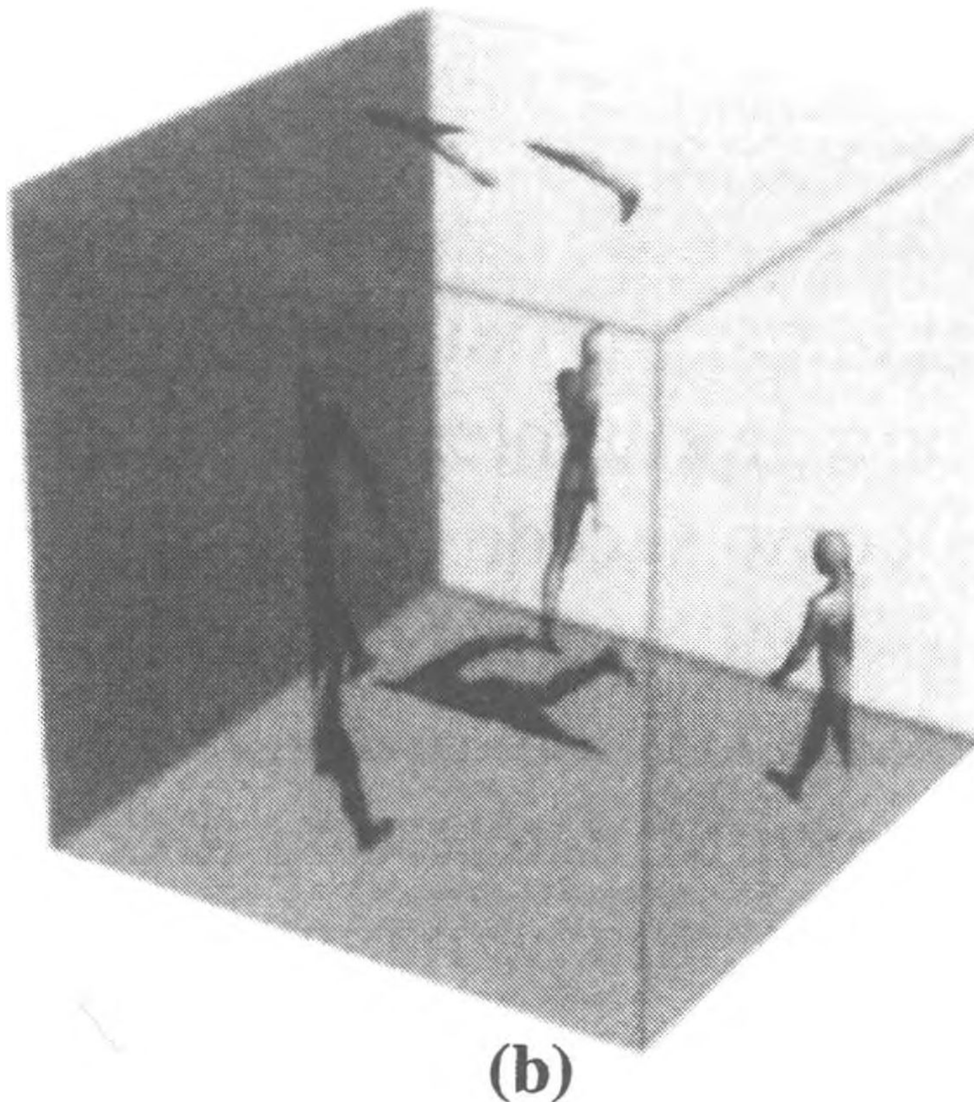


FIGURA 8.5. **(a)** Una pantalla de videojuego es plana (en el sentido de «no curvada») y tiene un tamaño finito, pero no contiene bordes ni fronteras puesto que se «enrolla». Matemáticamente, una forma semejante se denomina un *toro tridimensional.* **(b)** Una versión tridimensional de la misma forma, llamada un *toro tridimensional,* es también plana (en el sentido de no curvada) y tiene un volumen finito, y tampoco tiene bordes ni fronteras, porque se enrolla. Si usted atraviesa una cara, entra por la cara opuesta.

Para representarlo, pensemos en uno de esos videojuegos en los que la pantalla parece tener bordes pero

en realidad no los tiene, puesto que usted no puede salir de ella realmente: si sale por el borde derecho, reaparece en el izquierdo; si sale por el borde superior, reaparece en el inferior. La pantalla «se enrolla» identificando superior con inferior e izquierda con derecha, y de esa manera la forma es plana y tiene tamaño *finito* pero no tiene borde. Matemáticamente, esta forma se denomina un *toro tridimensional',* se ilustra en la figura 8.5a.**[8.12]** La versión tridimensional de esta forma —un toro tridimensional— ofrece otra forma posible para el tejido del espacio. Puede pensar en esta forma como un cubo enorme que se enrolla a lo largo de los tres ejes: cuando usted atraviesa la parte superior reaparece en la inferior, cuando usted atraviesa la parte trasera, reaparece delante, cuando atraviesa el lado izquierdo reaparece en el derecho, como en la figura 8.5b. Dicha forma es plana —de nuevo, en el sentido de no estar curvada, no en el sentido de ser como un pastel— tridimensional, finita en todas las direcciones y pese a todo no tiene bordes ni fronteras.

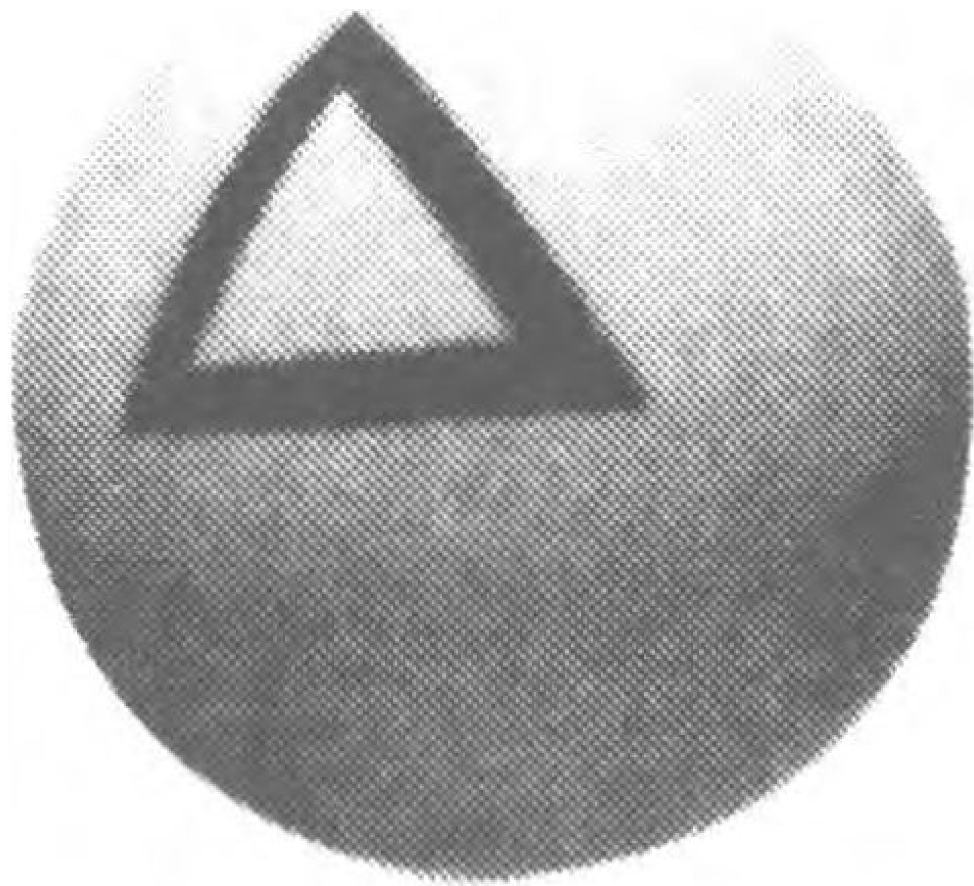
Además de estas posibilidades hay aún otra forma compatible con la explicación del espacio en expansión simétrica para el descubrimiento de Hubble. Aunque es difícil de representar en tres dimensiones, como sucede con el ejemplo esférico, hay un buen sustituto bidimensional: una versión infinita de una patata frita Pringle. Esta forma, a menudo conocida como *silla de montar,* es una especie de inversa de la esfera. Mientras que una esfera es simétricamente hinchada hacia afuera, la silla de montar está simétricamente contraída hacia adentro, como se ilustra en la figura 8.6. Usando un poco de terminología matemática, decimos que la esfera está *positivamente curvada* (hinchada hacia afuera), la silla de montar está *negativamente curvada* (se contrae hacia adentro), y el

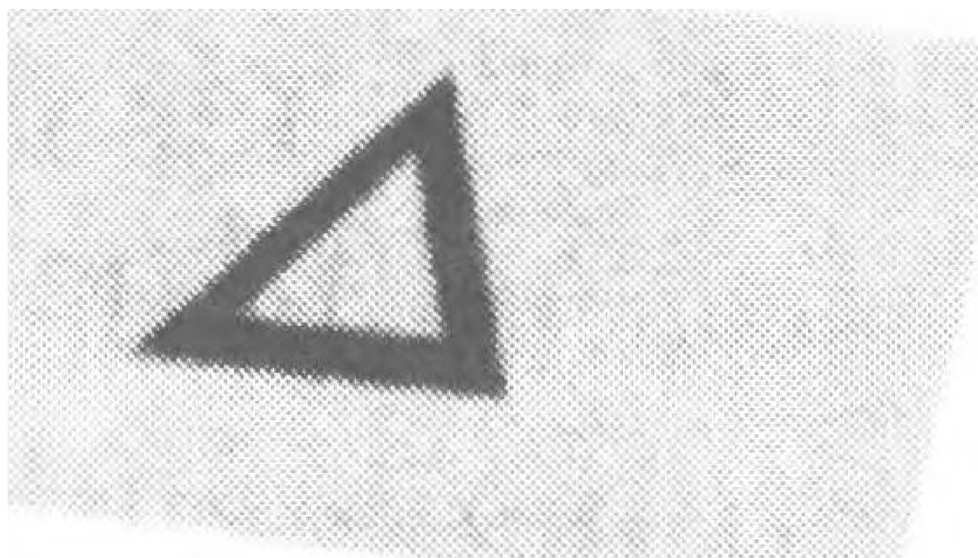
espacio plano —ya sea infinito o finito— *no tiene curvatura* (ni hinchazón ni contracción).[*22]

Los investigadores han demostrado que esta lista —uniformemente positiva, negativa o cero— agota las curvaturas posibles para el espacio que son compatibles con el requisito de simetría entre todas las posiciones y en todas las direcciones. Y eso es verdaderamente asombroso. Estamos hablando de la forma del universo entero, algo para lo que hay infinitas posibilidades. Pese a todo, invocando el inmenso poder de la simetría, los investigadores han podido estrechar firmemente las posibilidades. Y por ello, si usted permite que la simetría guíe su respuesta, y su interrogador de la noche pasada le deja que haga un simple puñado de conjeturas, usted será capaz de afrontar su desafío.[8.13]

(a)

(b)





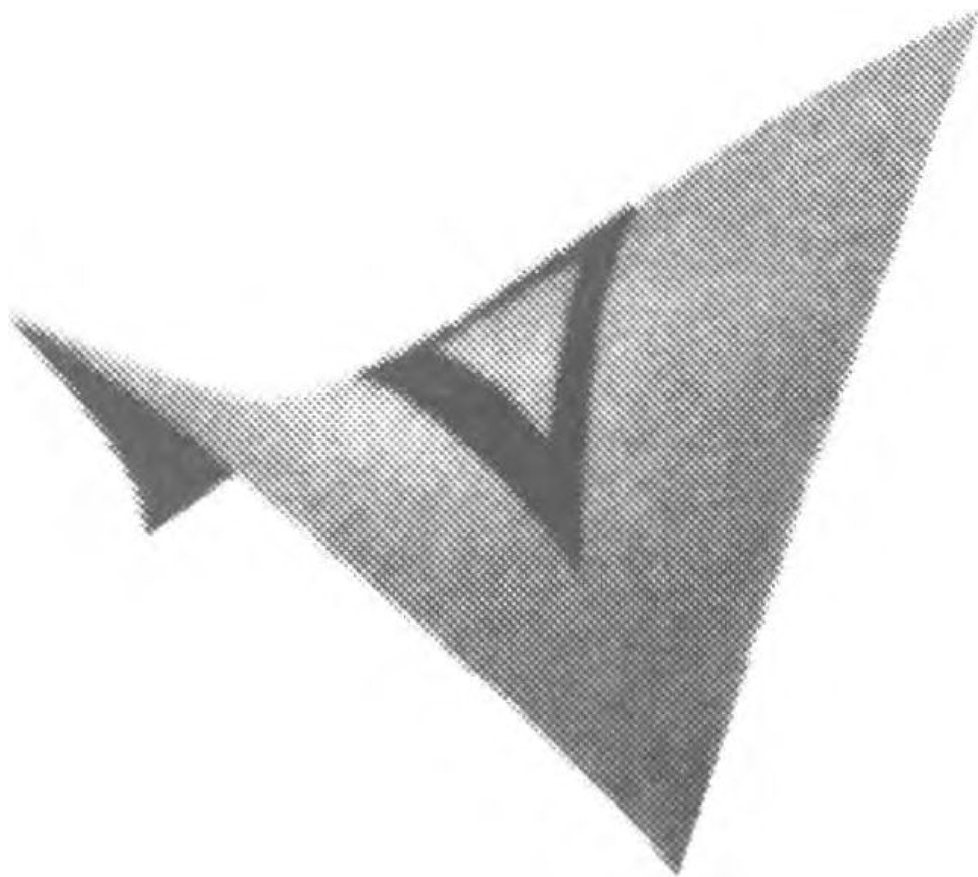


FIGURA 8.6. Utilizando la analogía bidimensional para el espacio, hay tres tipos de curvatura que son completamente simétricos —es decir, curvaturas en que la vista desde cualquier lugar es la misma que desde cualquier otro—. Éstas son **(a)** curvatura *positiva,* que se abomba uniformemente hacia afuera, como en una esfera; (b) curvatura *cero,* que no se abomba en absoluto, como en un plano infinito o una pantalla de videojuego; **(c)** curvatura *negativa,* que se contrae uniformemente hacia adentro, como en una silla de montar.

De todas formas, usted podría preguntar por qué hemos llegado a una variedad de formas posibles para el tejido del espacio. Habitamos en un único universo, de modo que ¿por

qué no podemos especificar una única forma? Bien, las formas que hemos enumerado son las únicas compatibles con nuestra creencia en que cualquier observador, independientemente de dónde esté situado en el universo, debería ver un cosmos idéntico en la escala máxima. Pero tales consideraciones de simetría, aunque altamente selectivas, no son capaces de llegar hasta el final y seleccionar una respuesta única. Para eso necesitamos las ecuaciones de Einstein de la relatividad general.

Como entrada, las ecuaciones de Einstein toman la cantidad de materia y energía en el universo (que, de nuevo por consideraciones de simetría, se suponen uniformemente distribuidas) y como salida dan la curvatura del espacio. La dificultad está en que durante muchas décadas los astrónomos han sido incapaces de ponerse de acuerdo en cuánta materia y energía hay realmente. Si toda la materia y la energía en el universo estuviesen repartidas uniformemente a lo largo del espacio, y si, después de hacer esto, resultara ser más que la denominada densidad crítica de aproximadamente 0,00000000000000000000001 (10^{-23}) gramos en cada metro cúbico[*23]

—aproximadamente 5 átomos de hidrógeno por metro cúbico— las ecuaciones de Einstein darían una curvatura positiva para el espacio; si fuera menos que la densidad crítica, las ecuaciones implicarían curvatura negativa; si fuera exactamente la densidad crítica, las ecuaciones nos dirían que el espacio no tiene curvatura global. Aunque esta cuestión observacional está todavía por zanjar definitivamente, los datos más refinados están inclinando la aguja del lado de la no curvatura: la forma plana. Pero la cuestión de si el conejito de Energizer podría moverse para siempre en una dirección y desaparecer en la oscuridad, o si un día completaría el círculo y aparecería por detrás —si el espacio continúa para siempre o se enrolla como una

pantalla de vídeo— sigue estando completamente abierta. **[8.14]**

Incluso así, incluso sin una respuesta final para la forma del tejido cósmico, lo que es bastante claro es que la simetría es *el* factor esencial que nos permite abarcar espacio y tiempo cuando se aplican al universo en conjunto. Sin invocar el poder de la simetría, hubiéramos quedado atascados en la primera esquina.

La cosmología y el espaciotiempo

Ahora podemos ilustrar la historia cósmica combinando el concepto de espacio en expansión con la descripción de la barra de pan del espaciotiempo del capítulo 3. Recuerde que en la descripción de la barra de pan, cada rebanada —incluso si es bidimensional— representa todo el espacio tridimensional en un único instante de tiempo desde la perspectiva de un observador particular. Diferentes observadores rebanan la barra a diferentes ángulos, dependiendo de los detalles de su movimiento relativo. En los ejemplos encontrados previamente, no tuvimos en cuenta la expansión del espacio y, en su lugar, imaginamos que el tejido del cosmos era fijo e invariable en el tiempo.

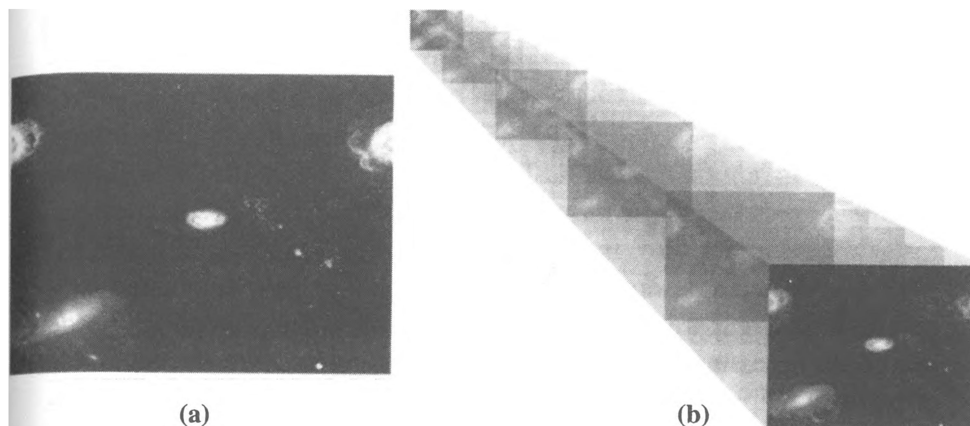


FIGURA 8.7, **(a)** Una imagen esquemática que muestra todo el espacio precisamente ahora, suponiendo que el espacio es plano y finito en extensión, i. e., con la forma de una pantalla de videojuego. Nótese que la galaxia de arriba a la derecha aparece de nuevo por la izquierda, **(b)** Una imagen esquemática que muestra todo el espacio cuando evoluciona a lo largo del tiempo, donde se han resaltado por claridad unas pocas rebanadas temporales. Nótese que el tamaño global del espacio y la separación entre galaxias disminuye a medida que miramos más atrás en el tiempo.

Ahora podemos refinar esos ejemplos incluyendo la evolución cosmológica.

Para hacerlo, adoptaremos la perspectiva de observadores que están en reposo con respecto al espacio —es decir, observadores cuyo movimiento se debe únicamente a la expansión cósmica, igual que los Lincolns pegados al globo—. Una vez más, incluso si se están moviendo unos respecto a otros, hay simetría entre todos estos observadores —todos sus relojes coinciden— y por ello rebanan la barra del espaciotiempo exactamente de la misma manera. Sólo el movimiento relativo que excede del que procede de la expansión del espacio, sólo el movimiento relativo *a través* del espacio frente al movimiento del hinchamiento del espacio, daría como resultado que sus relojes se desincronizaran y sus

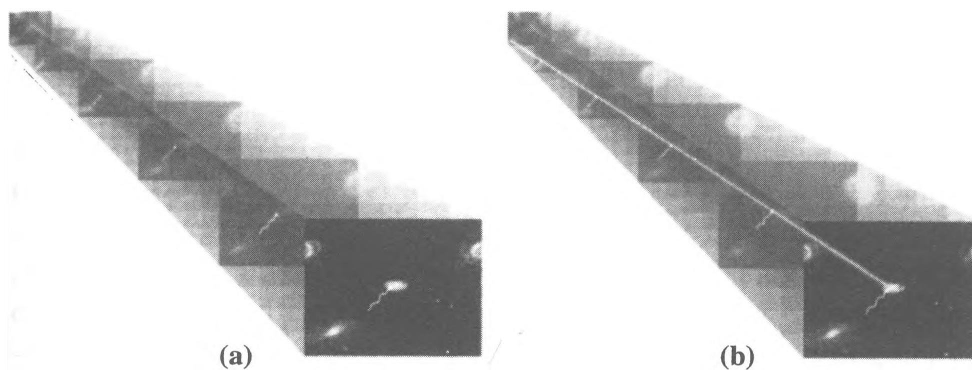
rebanadas de la barra espaciotempotal fueran a ángulos diferentes. También tenemos que especificar la forma del espacio, y para fines de comparación consideraremos algunas de las posibilidades discutidas más arriba.

El ejemplo más fácil de dibujar es el de la forma plana e infinita, el videojuego. En la figura 8.7a mostramos una rebanada en dicho universo, una imagen esquemática que usted debería considerar que representa todo el espacio precisamente ahora. Por simplicidad, imagine que nuestra galaxia, la Vía Láctea, está en el centro de la figura, pero tenga en cuenta que ningún lugar es en absoluto especial comparado con cualquier otro. Incluso los bordes son ilusorios. El borde superior no es un lugar donde el espacio termina, puesto que usted puede cruzarlo y reaparecer por el borde inferior; análogamente, el borde izquierdo no es un lugar donde el espacio termina, puesto que puede cruzarlo y reaparecer por el borde derecho. Para acomodar las observaciones astronómicas, cada lado debería extenderse al menos hasta 14.000 millones de años luz (unos 130.000 trillones de kilómetros) desde su punto central, pero cada uno podría ser mucho mayor.

Note que precisamente ahora no podemos ver literalmente las estrellas y galaxias tal como están dibujadas en esta rebanada ahora puesto que, como discutimos en el capítulo 5, la luz emitida precisamente ahora por cualquier objeto necesita tiempo para llegar hasta nosotros. La luz que vemos cuando miramos al cielo en una noche clara fue emitida hace tiempo —hace millones e incluso miles de millones de años— y sólo ahora ha completado el largo viaje hacia la Tierra, ha entrado en nuestros telescopios y nos ha permitido extasiamos ante las maravillas del espacio profundo. Puesto que el espacio se está expandiendo, cuando esta luz fue emitida, hace eones de tiempo, el universo era mucho más pequeño. Ilustramos

esto en la figura 8.7b en la que hemos colocado nuestra rebanada ahora actual en el lado derecho de la barra e incluido una secuencia de rebanadas a la izquierda que muestran nuestro universo en momentos cada vez más tempranos de tiempo. Como usted puede ver, el tamaño global del espacio y las separaciones entre galaxias individuales decrecen a medida que miramos el universo en instantes cada vez más tempranos.

En la figura 8.8 puede ver también la historia de la luz, emitida por una lejana galaxia quizá hace mil millones de años, mientras viajaba hacia nosotros aquí en la Vía Láctea. En la rebanada inicial de la figura 8.8a, la luz es emitida primero, y en rebanadas posteriores puede ver que la luz se acerca cada vez más incluso a medida que el universo se hace cada vez mayor, y finalmente puede ver que nos alcanza en la rebanada más extrema a la derecha. En la figura 8.8b, que conecta los lugares de cada rebanada que atravesó el frente de la luz durante su viaje, mostramos la trayectoria de la luz a través del espaciotiempo. Puesto que recibimos luz de muchas direcciones, la figura 8.8c representa una muestra de trayectorias a través del espacio y el tiempo que siguen diversos rayos de luz para llegar hasta nosotros.



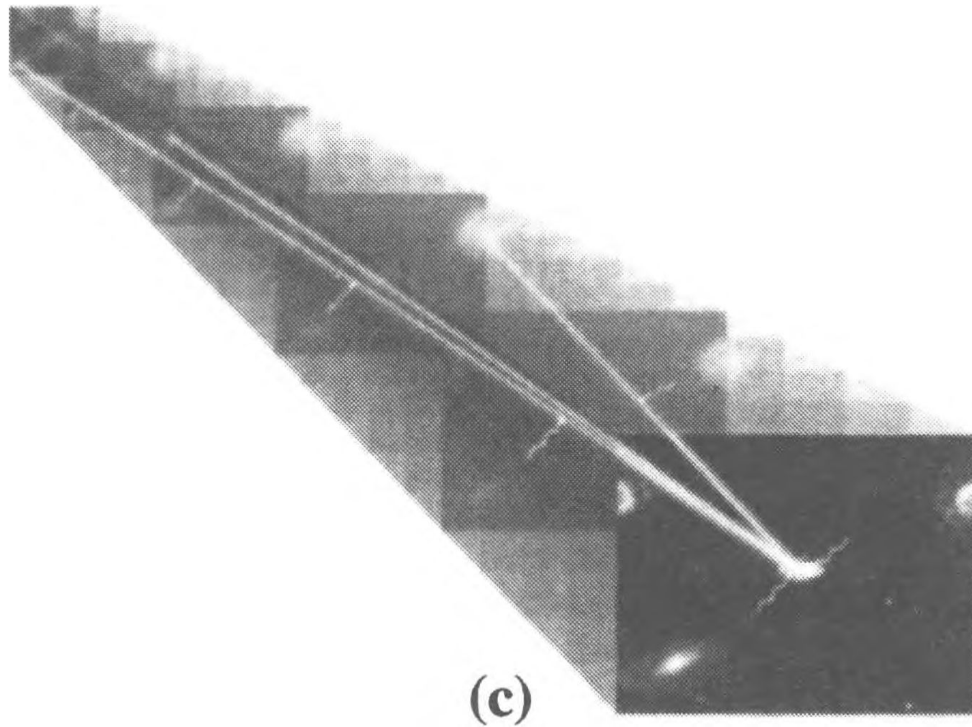


FIGURA 8.8. **(a)** La luz emitida hace mucho tiempo desde una galaxia lejana está cada vez más cerca de la Vía Láctea en rebanadas de tiempo posteriores. (b) Cuando finalmente vemos la galaxia lejana, estamos mirando a través del espacio y el tiempo, puesto que la luz fue emitida hace mucho tiempo. Se resalta la trayectoria que sigue la luz a través del espaciotiempo. **(c)** Las trayectorias a través del espaciotiempo que sigue la luz emitida desde varios cuerpos astronómicos que vemos hoy.

Las figuras muestran de forma espectacular cómo puede utilizarse la luz que viene del espacio como una cápsula de tiempo cósmico.

Cuando miramos a la galaxia Andrómeda, la luz que recibimos fue emitida hace unos tres millones de años, de modo que estamos viendo Andrómeda tal como era en el pasado lejano. Cuando miramos el cúmulo Coma, la luz que recibimos fue emitida hace unos 300 millones de años y por ello estamos viendo el cúmulo Coma tal como era en una época aún muy anterior. Si precisamente ahora todas las

estrellas en todas las galaxias de este cúmulo se convirtieran en supernovas, aún seguiríamos viendo la misma imagen no perturbada del cúmulo Coma y lo haríamos así durante otros 300 millones de años; sólo entonces la luz de las estrellas que explosionan habrían tenido el tiempo suficiente para llegar hasta nosotros. Análogamente, si un astrónomo en el cúmulo Coma que está en nuestra rebanada de tiempo ahora orienta un potente supertelescopio hacia la Tierra, verá una abundancia de heléchos, artrópodos y reptiles primitivos; no verá la Gran Muralla china o la Torre Eiffel durante casi otros 300 millones de años. Por supuesto, este astrónomo, bien instruido en cosmología básica, se da cuenta que está viendo la luz emitida en el pasado lejano de la Tierra, y al dibujar su propia barra espaciotemporal cósmica asignará las bacterias primitivas de la Tierra a su época adecuada, a su conjunto adecuado de rebanadas de tiempo.

Todo esto supone que tanto nosotros como el astrónomo del cúmulo Coma nos estamos moviendo sólo con el flujo cósmico de la expansión espacial, puesto que esto asegura que su rebanamiento de la barra del espaciotiempo coincide con el nuestro —asegura que sus listas ahora coinciden con las nuestras—. Sin embargo, si él rompiera filas y se moviera a través del espacio superando sustancialmente el flujo cósmico, sus rebanadas estarían inclinadas respecto a las nuestras, como en la figura 8.9. En este caso, como encontramos con Chewie en la capítulo 5, el ahora de este astrónomo coincidirá con lo que nosotros consideramos nuestro futuro o nuestro pasado (dependiendo de si el movimiento adicional es hacia o alejándose de nosotros). Note, sin embargo, que sus rebanadas ya no serán espacialmente homogéneas. Cada rebanada inclinada en la figura 8.9 corta al universo en un abanico de épocas diferentes y por ello las rebanadas ya no son uniformes.

Esto complica significativamente la descripción de la historia cósmica, y ésa es la razón por la que los físicos y los astrónomos no contemplan en general tales perspectivas. En su lugar, normalmente sólo consideran la perspectiva de observadores que se mueven únicamente con el flujo cósmico, puesto que esto da rebanadas que son homogéneas —pero, hablando en términos fundamentales, cada punto de vista es tan válido como cualquier otro.

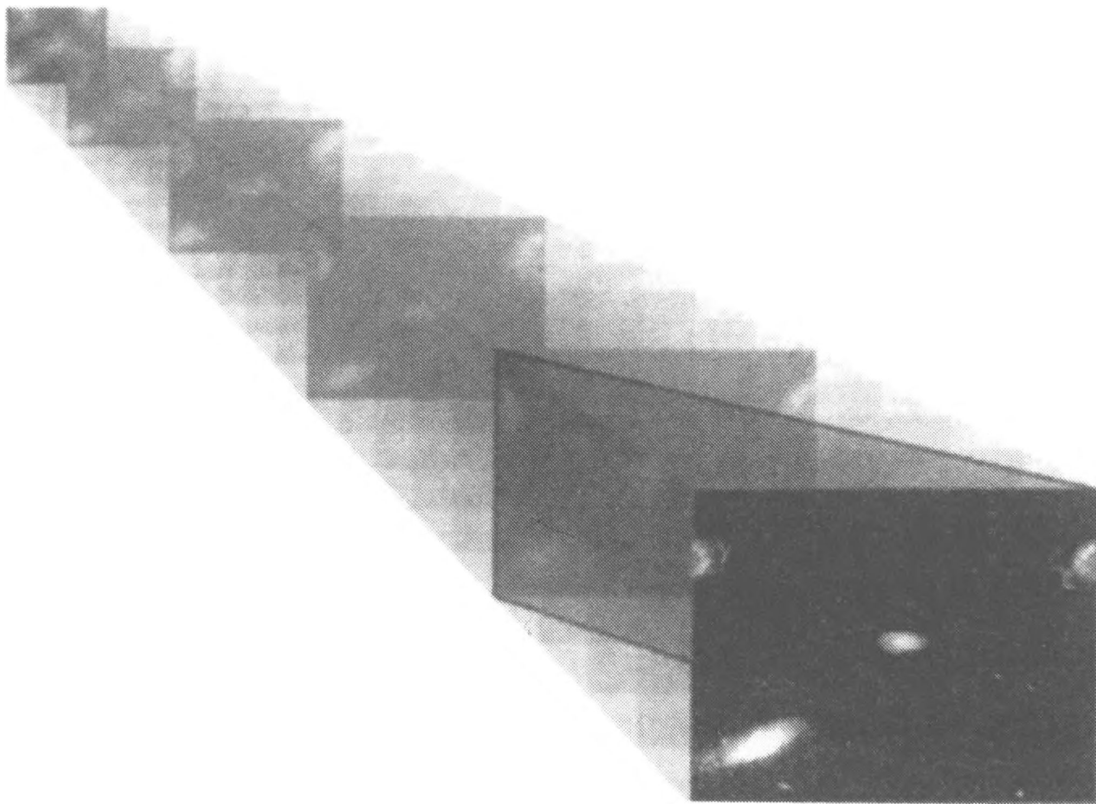


FIGURA 8.9. La rebanada de tiempo de un observador que se mueve significativamente en exceso con respecto al flujo cósmico de la expansión espacial.

A medida que miramos más a la izquierda en la barra espaciotem- poral cósmica, el universo se hace cada vez más pequeño y cada vez más denso. E igual que la rueda de

una bicicleta se hace cada vez más caliente cuando usted comprime cada vez más aire en su interior, el universo se hace cada vez más caliente a medida que materia y radiación son comprimidas cada vez más por la contracción del espacio. Si retrocedemos hasta unas simples diez millonésimas de segundo después del comienzo, el universo se hace tan denso y tan caliente que la materia ordinaria se desintegra en un plasma primordial de constituyentes elementales de la naturaleza. Y si continuamos nuestro viaje, directamente hasta casi el propio instante cero —el instante del *big bang*— el universo entero conocido está comprimido en un tamaño tal que, comparado con él, el punto final de esta frase parece gigantesco. Las densidades en una época tan temprana eran tan grandes, y las condiciones tan extremas, que las teorías físicas más refinadas que tenemos actualmente son incapaces de damos una idea de lo que sucede. Por razones que se harán cada vez más evidentes, las altamente satisfactorias leyes de la física desarrolladas en el siglo XX dejan de valer en condiciones tan intensas, dejándonos sin timón en nuestra búsqueda por comprender el inicio del tiempo. Pronto veremos que desarrollos recientes están proporcionando un faro esperanzador, pero por ahora admitimos nuestra incompleta comprensión de lo que sucedió en el comienzo colocando una región borrosa en el extremo izquierdo de la barra del espaciotiempo cósmico —nuestra versión de la *térra incógnita* en los mapas antiguos—. Con este toque final, presentamos la figura 8.10 como una ilustración a grandes rasgos de la historia cósmica.

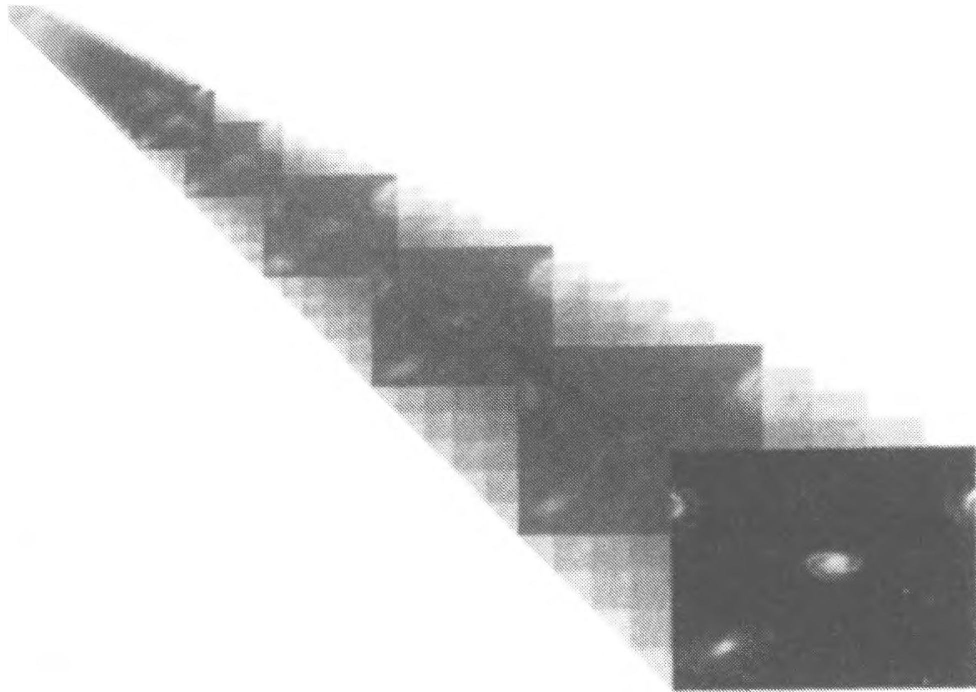


FIGURA 8.10. Historia cósmica —la «barra» espaciotemporal— para un universo que es plano y de extensión espacial finita. La borrosidad en la parte superior denota nuestra carencia de conocimiento cerca del comienzo del universo.

Formas alternativas

Hasta ahora hemos supuesto que el espacio tiene la forma de una pantalla de videojuego, pero muchas de las características de esta historia son válidas para las otras posibilidades. Por ejemplo, si los datos

muestran en última instancia que la forma del espacio es esférica, entonces, a medida que retrocedemos en el tiempo, el tamaño de la esfera se hace cada vez menor, el universo se hace cada vez más denso y más caliente, y en el instante cero encontramos algún tipo de comienzo *big*

bang. Es retador dibujar una ilustración análoga a la de la figura 8.10 puesto que las esferas no se apilan limpiamente una junto a otra (por ejemplo, usted puede imaginar una «barra esférica» en la que cada rebanada es una esfera que rodea a la anterior), pero aparte de las complicaciones gráficas, la física es básicamente la misma.

Los casos de espacio plano infinito y espacio infinito en forma de silla de montar comparten también muchas características con las dos formas ya discutidas, pero difieren en un aspecto esencial. Echemos una mirada a la figura 8.11, en la que las rebanadas representan espacio plano que se prolonga indefinidamente (del que sólo podemos mostrar una parte, por supuesto). A medida que usted mira instantes más tempranos, el espacio se contrae; las galaxias se acercan cada vez más cuanto más atrás mira usted en la figura 8.11b. Sin embargo, el tamaño global del espacio sigue siendo el mismo. ¿Por qué? Bien, el infinito es una cosa divertida. Si el espacio es infinito y usted contrae todas las distancias en un factor dos, el tamaño del espacio se hace la mitad de infinito, y eso sigue siendo infinito. De modo que aunque todo se hace más próximo y las densidades se hacen cada vez mayores a medida que usted retrocede más en el tiempo, el tamaño total del universo sigue siendo infinito; las cosas se hacen más densas en todas partes en un espacio de extensión infinita. Esto da una imagen bastante diferente del *big bang.*

Normalmente imaginamos que el universo empezó como un punto, aproximadamente como en la figura 8.10, en el que no hay tiempo ni espacio exterior. Luego, por algún tipo de erupción, el espacio y el tiempo se desplegaron desde su forma comprimida y tomó vuelo la expansión del universo. Pero si el universo es espacialmente infinito, *ya había una extensión espacial infinita en el instante del «big bang».* En este instante inicial, la densidad de energía se disparó y se

alcanzó una temperatura incomparablemente alta, pero estas condiciones extremas existían en todas partes, no sólo en un único punto. En este escenario, el *big bang* no tuvo lugar en un punto; más bien, la erupción del *big bang* tuvo lugar *en todas partes* de la extensión infinita. Comparando esto con el comienzo convencional en un único punto, es como si hubiera muchos *big bangs,* uno en cada punto de la extensión espacial infinita. Después del *bang* el espacio se hinchó, pero su tamaño total no aumentó porque algo que ya es infinito no puede hacerse más grande. Lo que aumentó fueron las separaciones entre objetos como galaxias (una vez que se hubieron formado), como puede ver mirando de izquierda a derecha en la figura 8.11b. Un observador como usted o como yo, mirando desde una u otra galaxia, vería alejarse todas las galaxias circundantes, precisamente lo que descubrió Hubble.

(a)



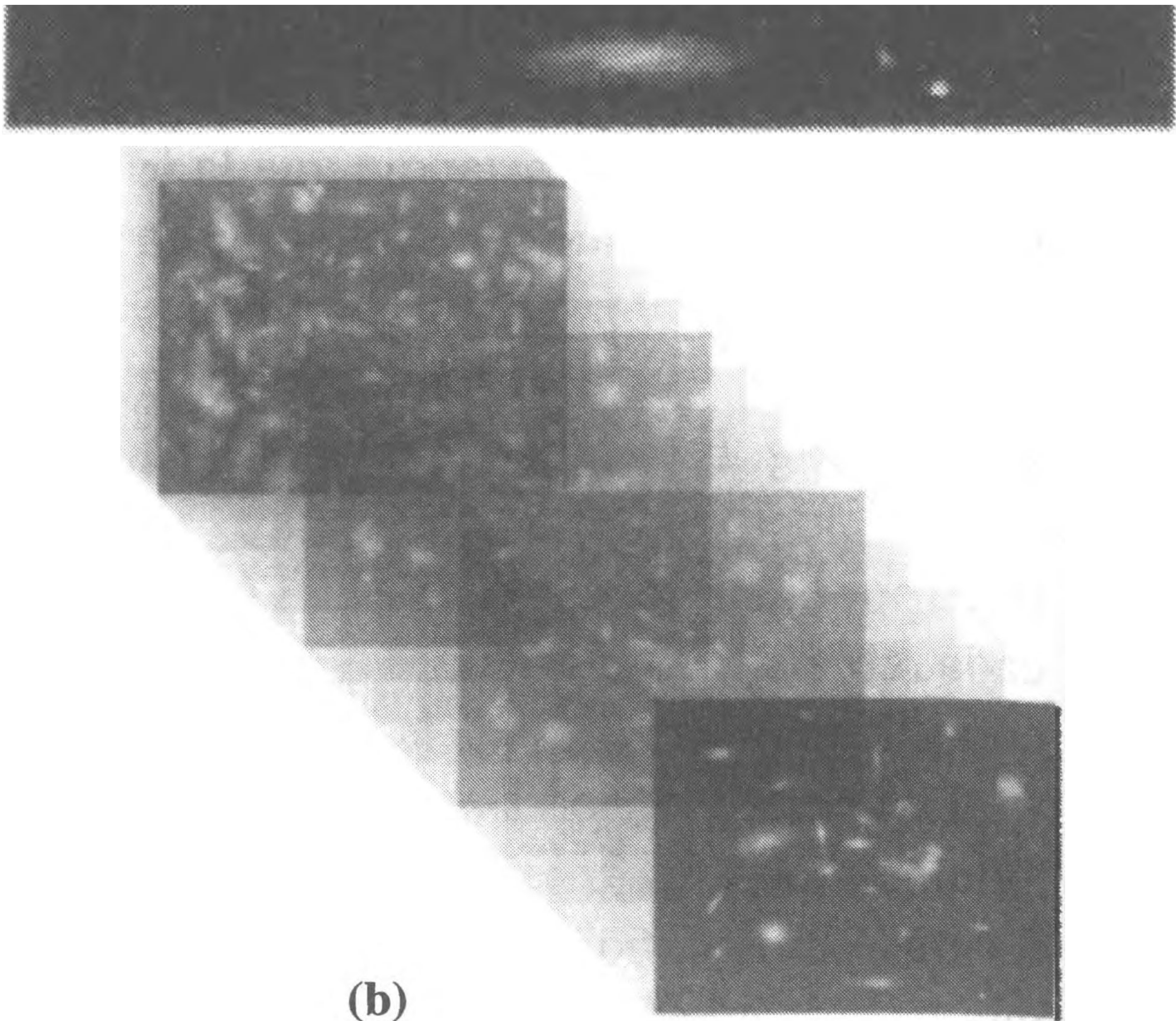


FIGURA 8.11. (a) Representación esquemática del espacio infinito, poblado por galaxias, (b) El espacio se contrae en tiempos cada vez anteriores —de modo que las galaxias están más próximas y más densamente empaquetadas en tiempos anteriores— pero el tamaño global del espacio infinito sigue siendo infinito. Nuestra ignorancia de lo que sucede en los instantes más tempranos se denota de nuevo por una región borrosa, pero aquí la región se extiende a través de la extensión espacial infinita.

Tenga en cuenta que este ejemplo del espacio plano infinito es mucho más que académico. Veremos que hay evidencia creciente de que la forma global del espacio no es

curva, y puesto que por ahora no hay evidencia de que el espacio tenga la forma de un videojuego, la forma espacial plana e infinitamente grande es el primer candidato para la estructura a gran escala del espaciotiempo.

Cosmología y simetría

Las consideraciones de simetría han sido claramente indispensables para el desarrollo de la moderna teoría cosmológica. El significado del tiempo, su aplicabilidad al universo en conjunto, la forma global del espacio, e incluso el marco subyacente de la relatividad especial, todo descansa sobre fundamentos de simetría. Incluso así, hay aún otra manera en que las ideas de simetría han conformado el cosmos en evolución. En el curso de la historia, la temperatura del universo ha barrido un enorme intervalo, desde los instantes terriblemente calientes inmediatamente después del *big bang* hasta los pocos grados sobre el cero absoluto que usted encontraría si colocara un termómetro en el espacio profundo. Y, como explicaré en el próximo capítulo, debido a una interdependencia crítica entre calor y simetría, lo que vemos hoy es probablemente tan sólo un residuo frío de la simetría mucho más rica que moldeó el universo primitivo y determinó algunas de las características más familiares y esenciales del cosmos.

— 9 —

Caminos a la realidad

El calor, la nada y la unificación

Durante el 95 por 100 de la historia del universo, un corresponsal cósmico especializado en dar noticias de la forma general y a grandes rasgos del universo habría contado más o menos la misma historia: *El universo sigue expandiéndose. La materia sigue dispersándose debido a la expansión. La densidad del universo sigue disminuyendo. La temperatura sigue bajando. En las escalas más grandes el universo mantiene una apariencia homogénea y simétrica.* Pero no siempre habría sido tan fácil cubrir el cosmos. Las etapas más tempranas habrían requerido una actividad informativa muy agitada, porque en aquellos momentos iniciales el universo sufrió un rápido cambio. Y ahora sabemos que lo que sucedió entonces ha desempeñado un papel dominante en lo que experimentamos hoy.

En este capítulo nos centraremos en los momentos críticos en la primera fracción de segundo después del *big bang,* cuando se cree que la cantidad de simetría incorporada en el universo ha cambiado abruptamente, y cada cambio inicia una época profundamente diferente en la historia cósmica. Aunque el corresponsal puede ahora enviar tranquilamente las mismas pocas líneas cada pocos miles de millones de años, en aquellos primeros instantes de simetría rápidamente cambiante el trabajo habría sido

muchísimo más exigente, porque la estructura básica de la materia y las fuerzas responsables de su equilibrio habrían sido completamente desconocidos. La razón está ligada a la interrelación entre calor y simetría, y requiere un replanteamiento

completo de lo que entendemos por las nociones de espacio vacío y de nada. Como veremos, tal replanteamiento no sólo enriquece sustancialmente nuestra comprensión de los primeros momentos del universo sino que también nos lleva un paso más cerca de realizar un sueño del que hablaron Newton, Maxwell y, en particular, Einstein: el sueño de la unificación. De igual importancia, estos desarrollos fijan el escenario para el marco cosmológico más moderno, la *cosmología inflacionaria,* una aproximación que anuncia respuestas a algunas de las preguntas más apremiantes y los enigmas más espinosos sobre los que calla el modelo estándar del *big bang.*

Calor y simetría

Cuando las cosas se hacen muy calientes o muy frías, a veces cambian. Y a veces el cambio es tan pronunciado que uno ni siquiera puede reconocer las cosas con las que empezó. Debido a las tórridas condiciones inmediatamente después del *bang,* y la posterior caída rápida de la temperatura conforme el espacio se expandía y enfriaba, comprender los efectos de un cambio de temperatura es crucial para tratar de resolver la historia temprana del universo. Pero empecemos con lo más sencillo. Empecemos con hielo.

Si usted calienta un pedazo de hielo muy frío, al principio no suceden muchas cosas. Aunque su temperatura aumenta, su apariencia casi no cambia. Pero si usted eleva

su temperatura hasta los 0 grados Celsius y sigue calentando, algo espectacular sucede de repente. El hielo sólido empieza a fundirse y se convierte en agua líquida. No deje que la familiaridad de esta transformación devalúe el espectáculo. Sin experiencias previas que incluyan hielo y agua, sería un reto darse cuenta de la íntima conexión entre ellos. Uno es sólido como una roca mientras que la otra es un líquido viscoso. Una simple observación no revela ninguna evidencia directa de que su constitución molecular, H_2O, es idéntica. Si usted no hubiera visto antes hielo o agua y se le presentaran en sendos recipientes, es probable que al principio pensara que no estaban relacionados. Y pese a todo, cuando cualquiera de ellos cruzara los 0 grados Celsius, usted sería testigo de una maravillosa alquimia cuando uno se transforma en otro.

Si usted sigue calentando agua líquida, encontrará otra vez que durante un tiempo no sucede casi nada aparte de un aumento continuo de la temperatura. Pero luego, cuando llega a los 100 grados Celsius, hay otro cambio brusco: el agua líquida empieza a hervir y transformarse en vapor, un gas caliente que una vez más no está obviamente relacionado con el agua líquida o el hielo sólido. Pero de hecho, los tres comparten la misma composición molecular. Los cambios de sólido a líquido y de líquido a gas se conocen como *transiciones de fase.* La mayoría de las sustancias pasan por una serie similar de cambios si sus temperaturas varían en un rango suficientemente amplio. **[9.1]**

La simetría desempeña un papel central en las transiciones de fase. En casi todos los casos, si comparamos una medida adecuada de la simetría de algo antes o después de que sufra una transición de fase, encontramos un cambio importante. En una escala molecular, por ejemplo, el hielo tiene una forma cristalina con las

moléculas de H_2O dispuestas en una red hexagonal ordenada. Como las simetrías de la caja en la figura 8.1, la pauta general de las moléculas de hielo queda invariable sólo frente a ciertas manipulaciones especiales, tales como rotaciones en unidades de 60 grados alrededor de ejes particulares de la disposición hexagonal. Por el contrario, cuando calentamos hielo, la formación cristalina se funde en un agregado uniforme y agitado de moléculas —agua líquida— que permanece invariable bajo rotaciones de cualquier ángulo alrededor de cualquier eje. Así que, calentando el hielo y haciéndole sufrir una transición de fase sólido-a-líquido, lo hemos hecho más simétrico. (Recuerde, aunque usted podría pensar intuitivamente que algo más ordenado, como el hielo, es más simétrico, lo cierto es todo lo contrario: algo es más simétrico si puede someterse a más transformaciones, tales como rotaciones, sin que cambie su apariencia.)

Análogamente, si calentamos agua líquida y se convierte en vapor gaseoso, la transición de fase también da como resultado un aumento de simetría. En el agua, las moléculas de H_2O individuales están, en promedio, empaquetadas con el hidrógeno de una molécula contiguo al oxígeno de su vecina. Si usted rotara una u otra molécula perturbaría apreciablemente el patrón molecular. Pero cuando el agua hierve y se convierte en vapor, las moléculas van de un lado a otro libremente; ya no hay ninguna pauta para las orientaciones de las moléculas de H_2O, y por ello, si usted rotara una molécula o un grupo de moléculas, el gas parecería igual. Así pues, de la misma forma que la transición hielo-a-agua da como resultado un aumento de la simetría, la transición agua-a-vapor también lo hace. La mayoría de las sustancias (pero no todas) se comportan de forma similar, experimentando un aumento de simetría

cuando sufren transiciones de fase sólido-a-líquido y líquido-a-gas.[9.2]

La historia es muy parecida cuando usted enfría agua o casi cualquier otra sustancia; simplemente tiene lugar al revés. Por ejemplo, cuando usted enfría vapor gaseoso, al principio no sucede mucho, pero cuando su temperatura cae hasta 100 grados Celsius, repentinamente empieza a condensarse en agua líquida; cuando usted enfría agua líquida, no mucho sucede hasta que llega a 0 grados Celsius, momento en que repentinamente empieza a congelarse en hielo sólido. Y siguiendo el mismo razonamiento con respecto a las simetrías —pero a la inversa— concluimos que ambas transiciones de fase están acompañadas por una *reducción* de simetría. [*24]

Esto es lo que se refiere al hielo, agua, vapor y sus simetrías. ¿Qué tiene que ver todo esto con la cosmología? Bien, en la década de 1970 los físicos se dieron cuenta de que no sólo los objetos en el universo pueden sufrir transiciones de fase sino que también puede sufrirlas el cosmos en conjunto. Durante los últimos 14.000 millones de años el universo se ha expandido y descomprimido continuamente. Y de la misma forma que una rueda de bicicleta que pierde presión se enfría, la temperatura del universo en expansión ha descendido continuamente. Durante buena parte de esta disminución de la temperatura no sucedió mucho. Pero hay razones para creer que cuando el universo atravesó unas temperaturas críticas concretas —las análogas de los 100 grados Celsius para el vapor y 100 grados Celsius para el agua— sufrió un cambio radical y experimentó una reducción drástica de la simetría. Muchos físicos creen que ahora estamos viviendo en una fase «condensada» o «congelada» del universo, una fase que es muy diferente de épocas anteriores. Las transiciones de fase cosmológicas no implican literalmente un gas que se

condensa para dar un líquido, o un líquido que se congela para dar un sólido, aunque hay muchas similitudes cualitativas con estos ejemplos más familiares. Más bien, la «sustancia» que se condensó o congeló cuando el universo se enfrió hasta temperaturas concretas es un campo: más exactamente un *campo de Higgs.* Veamos lo que esto significa.

Fuerza, materia y campos de Higgs

Los campos proporcionan el marco para buena parte de la física moderna. El campo electromagnético, discutido en el capítulo 3, es quizá el campo más simple y más ampliamente apreciado de los campos de la Naturaleza. Viviendo entre emisiones de radio y televisión, comunicaciones de teléfonos móviles, el calor y la luz del Sol, estamos constantemente inmersos en un mar de campos electromagnéticos. Los fotones son los constituyentes elementales de los campos electromagnéticos, y pueden considerarse los transmisores microscópicos de la fuerza electromagnética. Cuando usted ve algo, puede considerarlo en términos de un campo electromagnético ondulante que entra en su ojo y estimula su retina, o en términos de fotones que entran en su ojo y hacen lo mismo. Por esta razón, el fotón es descrito a veces como la *partícula mensajera* de la fuerza electromagnética.

El campo gravitatorio es también familiar puesto que nos ancla constante y consistentemente, y a todo lo que nos rodea, a la superficie de la Tierra. Como sucede con los campos electromagnéticos, todos estamos inmersos en un mar de campos gravitatorios; el de la Tierra es dominante, pero también sentimos los campos gravitatorios del Sol, la Luna y los demás planetas. De la misma forma que los

fotones son partículas que constituyen un campo electromagnético, los físicos creen que los *gravitones* son partículas que constituyen un campo gravitatorio. Los gravitones todavía no han sido descubiertos experimentalmente, pero eso no es sorprendente. La gravedad es con mucho la más débil de todas las fuerzas (por ejemplo, un imán normal de frigorífico puede sostener un clip, superando así la atracción del campo gravitatorio de la Tierra entera) y por ello es comprensible que los experimentadores no hayan detectado todavía los constituyentes más mínimos de la fuerza más débil. Incluso sin confirmación experimental, no obstante, la mayoría de los físicos creen que igual que los fotones trasmiten la fuerza electromagnética (son las partículas mensajeras de la fuerza electromagnética) los gravitones trasmiten la fuerza gravitatoria (son las partículas mensajeras de la fuerza gravitatoria). Cuando usted deja caer un vaso, puede considerar el suceso en términos del campo gravitatorio de la Tierra tirando del vaso, o, utilizando la descripción geométrica más refinada de Einstein, puede considerarlo en términos del deslizamiento del vaso a lo largo de una muesca en el tejido del espaciotiempo provocado por la presencia de la Tierra, o —si los gravitones existenten realmente— también puede considerarlo en términos de gravitones que van de un lado a otro entre la Tierra y el vaso, comunicando un «mensaje» gravitatorio que «dice» al vaso que caiga hacia la Tierra.

Además de estos campos de fuerzas bien conocidos, hay otras dos fuerzas de la Naturaleza, la *fuerza nuclear fuerte* y la *fuerza nuclear débil,* que también ejercen su influencia vía campos. Las fuerzas nucleares son menos familiares que el electromagnetismo y la gravedad porque actúan sólo a escalas atómica y subatómica. Incluso así, su impacto en la vida diaria, a través de la fusión nuclear que hace que el Sol

brille, la fisión nuclear en acción en los reactores atómicos, y la desintegración radiactiva de elementos como el uranio y el plutonio, no es menos importante. Los campos de fuerzas nucleares fuerte y débil se denominan *campos de Yang-Mills,* pues C. N. Yang y Robert Mills desarrollaron sus bases teóricas en la década de 1950. Y de la misma forma que los campos electromagnéticos están compuestos de fotones, y los campos gravitatorios están, según se cree, compuestos de gravitones, los campos fuerte y débil también tienen partículas constituyentes. Las partículas de la fuerza fuerte se denominan *gluo- nes* y los de la fuerza débil se denominan partículas W y Z. La existencia de estas partículas fue confirmada por experimentos en aceleradores llevados a cabo en Alemania y en Suiza a finales de la década de 1970 y principios de la de 1980.

El marco del campo se aplica también a la materia. Hablando en términos generales, las ondas de probabilidad de la mecánica cuántica pueden considerarse como campos que llenan el espacio y proporcionan la probabilidad de que una u otra partícula de materia esté en uno u otro lugar. Un electrón, por ejemplo, puede considerarse como una partícula —una que deja un punto en una pantalla de fósforo, como en la figura 4.4— pero también puede (y debe) considerarse en términos de un campo ondulante, un campo que puede contribuir a una figura de interferencia en una pantalla de fósforo como en la figura 4.3b.[9.3] De hecho, aunque no voy a entrar aquí en mayor detalle,[9.4] la onda de probabilidad de un electrón está estrechamente asociada con algo denominado un *campo electrónico* —un campo que en muchos aspectos es similar a un campo electromagnético pero en el que el electrón desempeña un papel análogo al del fotón, siendo el constituyente más pequeño del campo electrónico—. El mismo tipo de

descripción mediante un campo es válido también para todas las demás especies de partículas materiales.

Habiendo discutido campos de materia y campos de fuerza, usted podría pensar que hemos cubierto todo. Pero hay un consenso general en que la historia contada hasta ahora no es completa. Muchos físicos creen firmemente que hay todavía un tercer tipo de campo, un tipo que nunca ha sido detectado experimentalmente pero que durante las dos últimas décadas ha desempeñado un papel central tanto en el pensamiento cosmológico moderno como en la física de las partículas elementales. Se denomina un campo de Higgs, por el físico escocés Peter Higgs.[9.5] Y si las ideas de la próxima sección son correctas, el universo entero está permeado por un océano de campo de Higgs —una reliquia fría del *big bang*— que es responsable de muchas de las propiedades de las partículas de las que estamos hechos usted, yo y cualquier otra cosa que hayamos encontrado.

Campos en un universo que se enfría

Los campos responden a la temperatura como lo hace la materia ordinaria. Cuanto más alta es la temperatura, más violentamente variará arriba y abajo —como la superficie de un puchero de agua hirviendo—el valor de un campo. A la temperatura característica del espacio profundo hoy (2,7 grados sobre el cero absoluto, o 2,7 Kelvin, como se denota habitualmente), o incluso a las temperaturas más calientes aquí en la Tierra, las ondulaciones del campo son minúsculas. Pero la temperatura inmediatamente después del *big bang* era tan enorme —se cree que a los 10^^{3} segundos después del *bang* la temperatura ha sido de unos 10^{32} Kelvin— que todos los campos variaban violentamente.

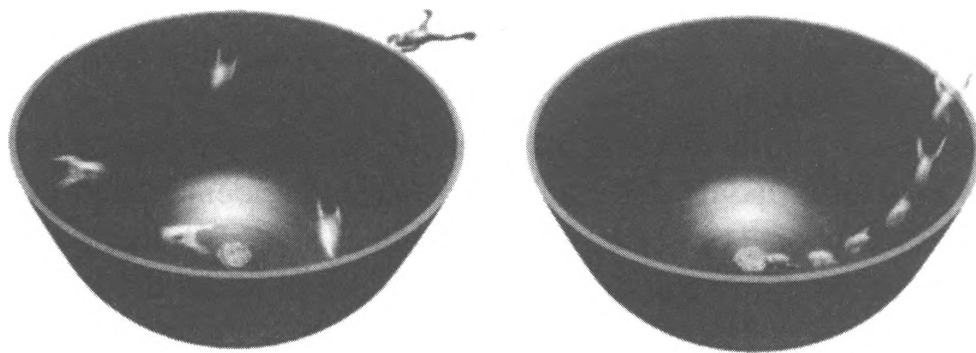
A medida que el universo se expandía y enfriaba, la inicialmente enorme densidad de materia y radiación cayó continuamente, la vasta extensión del universo se hizo cada vez más vacía y las ondulaciones del campo se hicieron cada vez más suaves. Para la mayoría de los campos esto significó que sus valores, en promedio, se acercaron a cero. En algún momento, el valor de un campo concreto podría fluctuar ligeramente por encima de cero (una cresta) y un instante después podría caer ligeramente por debajo de cero (un vientre), pero en promedio el valor de la mayoría de los campos era próximo a cero: el valor que asociamos intuitivamente con ausencia o vaciedad.

Aquí es donde entra el campo de Higgs. Los investigadores han llegado a la idea de que se trata de una variedad de campo que tenía propiedades similares a las de otros campos a las temperaturas inconcebiblemente altas inmediatamente después del *big bang:* también fluctuaba salvajemente arriba y abajo. Pero los investigadores creen que, de la misma forma que cuando la temperatura del vapor desciende lo suficiente se condensa en agua líquida, cuando la temperatura del universo descendió lo suficiente el campo de Higgs se condensó en un valor concreto *no nulo* en todo el espacio. Los físicos llaman a esto la formación de un *valor esperado no nulo del campo de Higgs del vacío* —pero para simplificar la jerga técnica, yo lo llamaré formación de un *océano de Higgs.*

Es similar a lo que sucedería si usted dejara caer una rana dentro de un cuenco metálico caliente, como en la figura 9.1a, con un montón de gusanos en el centro. Al principio la rana saltaría de un lado a otro —arriba, abajo, a la izquierda, a la derecha— en un intento desesperado de no quemarse las patas, y en promedio estaría tan lejos de los gusanos que ni siquiera sabría que estaban allí. Pero a medida que el cuenco se enfriara, la rana se tranquilizaría,

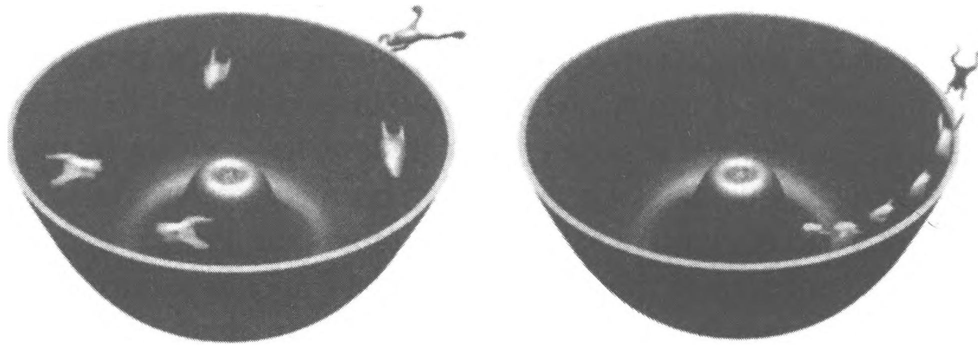
apenas saltaría y, en lugar de ello, se dejaría deslizar suavemente hacia abajo hasta el lugar más relajado en el fondo del cuenco. Allí, estando cerca del centro del cuenco, empezaría finalmente su cita con la comida, como en la figura 9.1b.

Pero si el cuenco tuviera una forma diferente, como en la figura 9.1c, las cosas resultarían distintas. Imagine de nuevo que el cuenco empieza muy caliente y que la pila de gusanos sigue estando en el centro del cuenco, ahora en lo alto de una protuberancia central. Si usted dejara caer la rana, de nuevo saltaría incontroladamente a un lado y a otro, inconsciente del premio colocado en la meseta central. Luego, cuando el cuenco se enfriara, la rana se calmaría de nuevo, reduciría sus saltos y se deslizaría por los lados suaves del cuenco. Pero debido a la nueva forma, la rana nunca llegaría hasta el centro del cuenco. En lugar de ello, se deslizaría hasta el valle del cuenco y se quedaría a una cierta distancia de la pila de gusanos, como en la figura 9.Id.



(a)(b)

FIGURA 9.1. **(a)** Una rana que se deja caer en un cuenco de metal caliente salta sin cesar, (b) Cuando el cuenco se enfría, la rana se calma, salta mucho menos y desliza hasta el centro del cuenco.



(c)

FIGURA 9.1. (c) Como en **(a),** pero con un cuenco caliente de una forma diferente. **(d)** Como en **(b),** pero ahora cuando el cuenco se enfría la rana desliza hasta el valle que está a cierta distancia del centro del cuenco (donde están situados los gusanos).

Si imaginamos que la distancia entre la rana y los gusanos representa el valor de un campo —cuanto más lejos está la rana de los gusanos, mayor es el valor del campo— y la altura de la rana representa la energía contenida en ese valor del campo —cuanto más alta está la rana, más energía contiene el campo— entonces estos ejemplos trasmiten el comportamiento de los campos cuando el universo se enfría. Cuando el universo está caliente, los campos saltan incontroladamente de un valor a otro, igual que la rana salta de un lugar a otro en el cuenco. Cuando el universo se enfría, los campos «se tranquilizan», saltan con menos frecuencia y menos frenesí, y sus valores se deslizan hacia la energía más baja.

Pero aquí está la clave. Como sucede con el ejemplo de la rana, existe la posibilidad de dos resultados cualitativamente diferentes. Si la forma del cuenco de energía del campo —su denominada *energía potencial*— es similar a la de la figura 9.1a, el valor del campo en todo el

espacio se deslizará hasta cero, el centro del cuenco, igual que la rana se desliza hasta la pila de gusanos. Sin embargo, si la energía potencial del campo es como la de la figura 9.1c, el valor del campo no llegará hasta cero, hasta el centro del cuenco de energía. En lugar de ello, de la misma forma que la rana se deslizará hasta el valle, que está a una distancia *no nula* del montón de gusanos, el valor del campo también se deslizará hasta el valle —a una distancia no nula del centro del cuenco— y eso significa que el campo tendrá un valor *no nulo?*[9.6] El último comportamiento es característico de los campos de Higgs. Cuando el universo se enfría, el valor del campo de Higgs queda atrapado en el valle y nunca llega a cero. Y puesto que lo que estamos describiendo sucedería uniformemente en todo el espacio, el universo estaría permeado por un campo de Higgs uniforme y no nulo: un océano de Higgs.

La razón por la que esto sucede arroja luz sobre la peculiaridad fundamental de los campos de Higgs. A medida que una región del espacio se hace cada vez más fría y más vacía —a medida que materia y radiación se hacen cada vez más dispersas —la energía en la región se hace cada vez menor. Llevando esto al límite, usted sabe que ha alcanzado la región del espacio más vacía que puede haber cuando ha reducido su energía todo lo posible. Para campos ordinarios que llenan una región del espacio, su contribución a la energía es mínima cuando su valor ha llegado hasta el centro del cuenco como en la figura 9. Ib; tienen energía cero cuando su valor es cero. Eso tiene buen sentido intuitivo puesto que asociamos vaciar una región del espacio con poner todo, incluso los valores del campo, a cero.

Pero en el caso de un campo de Higgs las cosas funcionan de forma diferente. Un rana sólo puede alcanzar la meseta central en la figura 9.1c, y estar a distancia *cero*

de la pila de gusanos, si tiene energía suficiente para saltar a la meseta desde el valle que la rodea. Del mismo modo, un campo de Higgs sólo puede alcanzar el centro del cuenco, y tener *valor cero,* si incorpora energía suficiente para superar la protuberancia central del cuenco. Si, por el contrario, la rana tiene poca o ninguna energía, se deslizará hasta el valle en la figura 9.Id —una distancia *no nula* de la pila de gusanos—. Análogamente, un campo de Higgs con poca o ninguna energía también se deslizará hasta el valle del cuenco, a una distancia no nula del centro del cuenco— y así tendrá un valor *no nulo.*

Para obligar a un campo de Higgs a tener un valor nulo —el valor que parecería ser lo más cerca que se puede llegar a eliminar por completo el campo de la región, el valor que parecería ser lo más cerca que puede llegar a un estado de nada— usted tendría que *elevar* su energía y, hablando en términos energéticos, la región del espacio no sería tan vacía como podría ser. Incluso si suena contradictorio, eliminar el campo de Higgs —es decir, reducir su valor a cero— es equivalente a añadir energía a la región. A modo de tosca analogía, piense en uno de esos fantásticos cascos para reducir el ruido que producen ondas sonoras que cancelan las que proceden del ambiente y que, de lo contrario, incidirían en sus tímpanos. Si los cascos trabajan perfectamente, usted oye silencio cuando ellos producen sus sonidos, pero usted oye el ruido ambiente si los desconecta. Los investigadores han llegado a creer que, de la misma forma que usted oye menos cuando los cascos están llenos de los sonidos para los que están programados, también el espacio frío y vacío alberga la mínima energía que puede albergar —está lo más vacío que puede estar— cuando está lleno de un océano de campo de Higgs. Los investigadores se refieren a lo más vacío que puede estar el espacio como *el vacío,* y así aprendemos que el vacío debe

estar permeado realmente por un campo de Higgs permanente.

El proceso por el que se supone que aparece un valor no nulo de un campo de Higgs en todo el espacio —se forma un océano de Higgs— se denomina *ruptura espontánea de simetría*[*25] y es una de las ideas más importantes que han aparecido en las últimas décadas de la física teórica del siglo xx. Veamos por qué.

El océano de Higgs y el origen de la masa

Si un campo de Higgs tiene un valor no nulo —si todos estamos inmersos en un océano de campo de Higgs— ¿no deberíamos sentirlo o verlo o ser conscientes del mismo de alguna manera? Absolutamente. Y la teoría moderna afirma que lo hacemos. Mueva su brazo de un lado a otro. Usted puede sentir sus músculos en acción impulsando la masa de su brazo a izquierda y derecha y vuelta atrás. Si sostiene una bola de bolos, sus músculos tendrán que trabajar más, puesto que cuanto más grande es la masa que ha de moverse, mayor es la fuerza que debe ejercer. En este sentido, la masa de un objeto representa la resistencia que ofrece a ser movido; más exactamente, la masa representa la resistencia que ofrece un objeto a los cambios de movimiento —a las aceleraciones— tales como ir primero hacia la izquierda y luego hacia la derecha y luego de nuevo hacia la izquierda. Pero ¿de dónde procede esta resistencia a ser acelerado? O, en el lenguaje de la física, ¿qué da a un objeto su inercia?

En los capítulos 2 y 3 encontramos varias propuestas que adelantaron Newton, Mach y Einstein como respuestas *parciales* a esta pregunta. Estos científicos trataban de especificar un patrón de reposo con respecto al cual podrían

definirse las aceleraciones, tales como las que aparecen en el experimento del cubo giratorio. Para Newton, el patrón era el espacio absoluto; para Mach, eran las estrellas lejanas, y para Einstein, era inicialmente el espaciotiempo absoluto (en la relatividad especial) y luego el campo gravitatorio (en la relatividad general). Pero una vez que habían definido un patrón de reposo y, en particular, habían especificado una referencia para definir las aceleraciones, ninguno de estos científicos dio el paso siguiente para explicar por qué los objetos se resisten a las aceleraciones. Es decir, ninguno de ellos especificó un mecanismo por el que un objeto adquiere su masa —su inercia— que es el atributo que se opone a las aceleraciones. Con el campo de Higgs los físicos han sugerido ahora una respuesta.

Los átomos que constituyen su brazo, y la bola que usted haya cogido, están hechos de protones, neutrones y electrones. A finales de la década de 1960 los experimentadores demostraron que protones y neutrones están compuestos de tres partículas más pequeñas conocidas como quarks. Así, cuando usted balancea el brazo de un lado a otro, está balanceando realmente todos los quarks y todos los electrones que lo constituyen, lo que nos lleva al punto que nos interesa. El océano de Higgs en el que, según la teoría moderna, todos estamos inmersos *interacciona* con quarks y electrones: opone resistencia a sus aceleraciones de forma muy parecida a como un tanque de melaza opone resistencia al movimiento de una pelota de ping-pong que se ha sumergido en el mismo. Y esta resistencia, esta fricción sobre las partículas constituyentes, contribuye a lo que usted percibe como la masa de su brazo y la bola que está balanceando, o como la masa de un objeto que está arrojando, o como la masa de todo su cuerpo cuando acelera hacia la línea de meta en una carrera de cien metros. Y así sentimos el océano de Higgs.

Las fuerzas que todos ejercemos miles de veces al día para cambiar la velocidad de un objeto u otro —para impartir una aceleración— son fuerzas que luchan contra la fricción del océano de Higgs.[9.8]

La metáfora de la melaza capta bien algunos aspectos del océano de Higgs. Para acelerar una pelota de ping-pong sumergida en melaza usted tendría que empujarla *mucho* más que cuando juega con ella en su mesa del sótano —se resiste a sus intentos de cambiar su velocidad con más fuerza que lo hace cuando no está en la melaza—, y así se comporta como si el estar sumergida en barro haya aumentado su masa. Análogamente, como resultado de sus interacciones con el ubicuo océano de Higgs, las partículas elementales se resisten a los intentos de cambiar sus velocidades: adquieren masa. Sin embargo, la metáfora del barro tiene tres características confusas de las que usted debería ser consciente.

En primer lugar, usted siempre puede meter la mano en la melaza, sacar la pelota de ping-pong y ver cómo disminuye su resistencia a la aceleración. Esto no es cierto en el caso de las partículas. Creemos que, hoy, el océano de Higgs llena todo el espacio, de modo que no hay manera de aislar a las partículas de su influencia; todas las partículas tienen las masas que tienen independientemente de dónde están. En segundo lugar, la melaza se opone a todo movimiento, mientras que el campo de Higgs sólo se opone al movimiento acelerado. A diferencia de una pelota de ping-pong moviéndose en la melaza, una partícula que se mueve en el espacio exterior a velocidad constante no sería frenada por la «fricción» con el océano de Higgs. Por el contrario, su movimiento continuaría invariable. Sólo cuando tratamos de acelerar o de frenar la partícula es cuando el océano de Higgs deja conocer su presencia por la fuerza que tenemos que ejercer. En tercer lugar, cuando se

trata de la materia familiar compuesta de conglomerados de partículas fundamentales, hay otra fuente de masa importante. Los quarks que constituyen los protones y los neutrones están unidos por la fuerza nuclear fuerte: los gluones (las partículas mensajeras de la fuerza fuerte) fluyen entre los quarks, «pegándolos». Los experimentos han mostrado que estos gluones tienen alta energía, y puesto que la $E = me^2$ de Einstein nos dice que la energía *(E)* puede manifestarse como masa *(ni),* aprendemos que los gluones dentro de los protones y los neutrones aportan una fracción importante de la masa total de dichas partículas. Así pues, una imagen más precisa es considerar la fuerza de fricción del océano de Higgs como algo que da masa a las partículas fundamentales tales como electrones y quarks; pero cuando estas partículas se combinan en partículas compuestas como protones, neutrones y átomos, otras fuentes de masa (bien entendidas) entran en juego.

Los físicos suponen que la resistencia que presenta el océano de Higgs a la aceleración de una partícula varía con el tipo concreto de partícula. Esto es esencial, porque todos los tipos conocidos de partículas fundamentales tienen masas diferentes. Por ejemplo, mientras que protones y neutrones están compuestos de dos tipos de quarks (llamados *quarks-up* y *quarks-dowrv.* un protón está hecho de dos up y un down; un neutrón, de dos down y un up), los experimentadores que utilizan colisionadores de átomos han descubierto otros cuatro tipos de quarks, cuyas masas cubren un amplio intervalo, desde 0,0047 a 189 veces la masa de un protón. Los físicos creen que la explicación para la diversidad de masas es que los diferentes tipos de partículas interaccionan con mayor o menor intensidad con el océano de Higgs. Si una partícula se mueve suavemente a través del océano de Higgs con poca o ninguna interacción, habrá poca o ninguna fricción y la partícula

tendrá poca o ninguna masa. El fotón es un buen ejemplo. El fotón pasa completamente desapercibido a través del océano de Higgs y por eso no tiene masa en absoluto. Si, por el contrario, una partícula interacciona de forma significativa con el océano de Higgs, tendrá una masa más alta. El quark más pesado (se denomina *quark top),* con una masa que es unas 350.000 veces la de un electrón, interacciona con el océano de Higgs 350.000 veces más intensamente que un electrón; tiene mayor dificultad para acelerarse a través del océano de Higgs y ésa es la razón por la que tiene una masa mayor. Si asemejamos la masa de una partícula a la fama de una persona, entonces el océano de Higgs es como los paparazzi: quienes son desconocidos pasan con facilidad a través del enjambre de fotógrafos, pero los políticos y las estrellas de cine famosas tienen que esforzarse mucho más para llegar a su destino. **[9.9]**

Esto da un bonito marco para pensar por qué una partícula tiene una masa diferente de otra, pero, hoy por hoy, no hay ninguna explicación fundamental para la manera exacta en que cada una de las partículas conocidas interacciona con el océano de Higgs. Como resultado, no hay ninguna explicación fundamental de por qué las partículas conocidas tienen las masas concretas que se han mostrado experimentalmente. Sin embargo, la mayoría de los físicos creen que si no fuera por el océano de Higgs, *todas las partículas fundamentales serían como el fotón y no tendrían masa.* De hecho, como veremos ahora, quizá eran así las cosas en los primeros momentos del universo.

Unificación en un universo que se enfría

Mientras que el vapor gaseoso se condensa en agua líquida a 100 grados Celsius, y el agua líquida se congela en hielo sólido a 0 grados Celsius, los estudios teóricos han mostrado que el campo de Higgs se condensa en un valor no nulo a mil billones (10^{15}) de grados. Eso es casi cien millones de veces la temperatura en el centro del Sol, y es la temperatura a la que se cree que ha caído el universo aproximadamente un cienmilmillonésima (10“^{H}) de segundo después del *big bang.* Antes de los 10^{-11} segundos después del *big bang* el campo de Higgs fluctuaba entre un valor y otro pero tenía un valor promedio nulo; como sucede con el agua por encima de 100 grados Celsius, a tales temperaturas no podía formarse un océano de Higgs porque era demasiado caliente. El océano se habría evaporado inmediatamente. Y sin un océano de Higgs no había resistencia a que las partículas experimentasen movimiento acelerado (los paparazzi desaparecían), lo que implica que todas las partículas conocidas (electrones, quarks-up, quarks-down, y demás) tenían la misma masa: cero.

Esta observación explica en parte por qué la formación de un océano de Higgs se describe como una transición de fase cosmológica. En las transiciones de fase de vapor a agua y de agua a hielo, suceden dos cosas esenciales. Hay un cambio cualitativo importante en la apariencia, y la transición de fase está acompañada por una reducción de simetría. Vemos las dos mismas características en la formación del océano de Higgs. En primer lugar, hubo un cambio cualitativo importante: tipos de partículas que habían carecido de masa adquirieron repentinamente masas distintas de cero —las masas que ahora se encuentran para dichas partículas—. En segundo lugar, este cambio estuvo acompañado de una reducción de simetría: antes de la formación del océano de Higgs, todas las partículas tenían la misma masa —cero— un estado de cosas altamente

simétrico. Si usted intercambiara un tipo de partículas por otro nadie lo sabría, puesto que todas las masas eran iguales. Pero después de que se condensara el campo de Higgs, los valores de las masas de las partículas se hicieron diferentes de cero —y desiguales— y por eso la simetría entre las masas se perdió.

De hecho, la reducción de la simetría que surge de la formación del océano de Higgs es todavía mayor. Por encima de 10^{15} grados, cuando el campo de Higgs aún no se había condensado, no sólo todos los tipos de partículas fundamentales de materia carecían de masa; sin la fuerza de resistencia de un océano de Higgs, también carecían de masa todos los tipos de partículas de fuerza . (Hoy, las partículas mensajeras W y Z de la fuerza nuclear débil tienen masas que están entre 86 y 97 veces la masa del protón.) Y, como originalmente descubrieron en la década de 1960 Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam, la carencia de masa de todas las partículas de fuerzas estuvo acompañada de otra simetría fantásticamente bella.

A finales del siglo xix, Maxwell se dio cuenta de que electricidad y magnetismo, aunque en un tiempo consideradas fuerzas independientes, son en realidad diferentes facetas de la misma fuerza: la fuerza electromagnética (ver capítulo 3). Su trabajo demostró que electricidad y magnetismo se complementan mutuamente; son el yin y el yang de un todo más unificado y simétrico. Glashow, Salam y Wein- berg descubrieron el siguiente capítulo en esta historia de unificación. Comprendieron que antes de que se formara el océano de Higgs, no sólo todas las partículas de fuerza tenían masas idénticas —cero— sino que los fotones y las partículas W y Z también eran esencialmente idénticos en todo lo demás.[9.10] De la misma forma que un copo de nieve no es afectado por las rotaciones especiales que intercambian las posiciones de

sus puntas, los procesos físicos en ausencia del océano de Higgs habrían sido inalterados por intercambios concretos de partículas de fuerzas electromagnética y nuclear débil —por intercambios concretos de fotones y partículas W y Z—. Y de la misma forma que la insensibilidad de un copo de nieve al ser rotado refleja una simetría (simetría de rotación), la insensibilidad al intercambio de estas partículas de fuerzas también refleja una simetría, una que por razones técnicas se denomina una *simetría gauge.* Tiene una consecuencia profunda. Puesto que dichas partículas transmiten sus respectivas fuerzas —son las partículas mensajeras de sus fuerzas— la simetría entre ellas significa que había simetría entre las fuerzas. Por consiguiente, a temperaturas suficientemente altas, temperaturas a las que se evaporaría el vacío actual lleno de Higgs, no hay diferencia entre la fuerza nuclear débil y la fuerza electromagnética. Es decir, a temperaturas suficientemente altas el océano de Higgs se evapora; cuando lo hace, también se evapora la diferencia entre las fuerzas débil y electromagnética.

Glashow, Weinberg y Salam habían ampliado el descubrimiento de Maxwell de un siglo antes demostrando que las fuerzas electromagnética y nuclear débil son en realidad parte de una misma y única fuerza. Habían unificado la descripción de estas dos fuerzas en lo que ahora se denomina *fuerza electrodébil.*

La simetría entre las fuerzas electromagnética y débil no es hoy evidente porque cuando se enfrió el universo, se formó el océano de Higgs, y —esto es vital— los fotones y las partículas W y Z interaccionan de forma diferente con el campo de Higgs condensado. Los fotones cruzan el océano de Higgs con tanta facilidad como una vieja gloria de serie B pasa en medio de los paparazzi, y por consiguiente sigue sin tener masa. Sin embargo, las partículas W y Z, como Bill

Clinton y Madonna, tienen que luchar para abrirse camino, adquiriendo masas que son 86 y 97 veces la de un protón, respectivamente. (Nota: esta metáfora no está a escala.) Por eso es por lo que las fuerzas electromagnética y nuclear débil parecen tan diferentes en el mundo que nos rodea. La simetría subyacente entre ellas está «rota», u oscurecida, por el océano de Higgs.

Éste es un resultado verdaderamente impresionante. Dos fuerzas que parecen muy diferentes a las temperaturas actuales —la fuerza electromagnética responsable de la luz, la electricidad y la atracción magnética, y la fuerza nuclear débil responsable de la desintegración radiactiva— son en esencia partes de la misma fuerza, y sólo parecen ser diferentes porque el campo de Higgs no nulo oscurece la simetría entre ellas. Así pues, lo que normalmente consideramos espacio vacío —el vacío, la nada— desempeña un papel central en hacer que las cosas del mundo tengan la apariencia que tienen. Sólo evaporando el vacío, elevando la temperatura lo suficiente de modo que el campo de Higgs se evapore —es decir, adquiera un valor medio nulo en todo el espacio— se haría evidente la completa simetría de las leyes de la Naturaleza.

Cuando Glashow, Weinberg y Salam estaban desarrollando estas ideas, las partículas W y Z todavía no se habían descubierto experimentalmente. Era la gran fe que tenían estos físicos en la potencia de la teoría y la belleza de la simetría la que les dio confianza para seguir adelante. Sus ideas se probaron bien fundadas. A su debido tiempo, las partículas W y Z fueron descubiertas y la teoría electrodébil fue confirmada experimentalmente. Glashow, Weinberg y Salam habían mirado más allá de las apariencias superficiales —habían penetrado en la nube que oscurecía la nada— para revelar una simetría profunda y sutil que entreteje dos de las cuatro fuerzas de la

Naturaleza. Fueron galardonados con el premio Nobel de 1979 por la unificación satisfactoria de la fuerza nuclear débil y el electromagnetismo.

Gran unificación

Cuando yo era estudiante de primer curso en la facultad, iba a ver de vez en cuando a mi tutor, el físico Howard Georgi. Yo nunca tenía mucho que decir, pero apenas importaba. Siempre había algo con lo que Georgi estaba entusiasmado y quería compartir con los estudiantes interesados. En una ocasión en particular, Georgi estaba especialmente excitado y habló ininterrumpidamente durante una hora llenando la pizarra varias veces con símbolos y ecuaciones. Mientras, yo movía la cabeza con entusiasmo. Pero, francamente, apenas entendía una palabra. Años más tarde comprendí que Georgi me había estado hablando de proyectos para poner a prueba el descubrimiento de lo que él había llamado *gran unificación.*

La gran unificación aborda una cuestión que sigue de forma natural al éxito de la unificación electrodébil. Si dos fuerzas de la Naturaleza fueron parte de un todo unificado en el universo primitivo, ¿podría darse el caso de que, incluso a temperaturas más altas y en instantes aún anteriores en la historia del universo, las diferencias entre tres o posiblemente las cuatro fuerzas pudiera evaporarse de forma análoga dando una simetría aún mayor? Esto plantea la intrigante posibilidad de que pudiera haber realmente una sola fuerza fundamental de la Naturaleza que, a través de una serie de transiciones de fase cosmológicas, ha cristalizado en las cuatro fuerzas aparentemente diferentes que conocemos actualmente. En 1974, Georgi y Glashow propusieron la primera teoría para ir

hacia este objetivo de unidad total. Su *teoría de gran unificación,* junto con ideas posteriores de Georgi, Helen Quinn y Weinberg, sugería que tres de las cuatro fuerzas —las fuerzas fuerte, débil y electromagnética— eran parte de una fuerza unificada cuando la temperatura estaba por encima de 10.000 billones de billones (10^{28}) de grados —unos 1.000 trillones de veces la temperatura en el centro del Sol— condiciones extremas que existían antes de $1O^{-35}$ segundos después del *bang.* Por encima de dicha temperatura, sugerían estos físicos, los fotones, los gluones de la fuerza fuerte, así como las partículas W y Z, podrían intercambiarse libremente entre sí —una simetría gauge más robusta que la de la teoría electrodé- bil— sin ninguna consecuencia observable. Georgi y Glashow sugerían así que a estas altas energías y temperaturas habría simetría completa entre las partículas de las tres fuerzas no gravitatorias, y con ello simetría completa entre las tres fuerzas no gravitatorias.**[9.11]**

La teoría de gran unificación de Glashow y Georgi seguía diciendo que no vemos esta simetría en el mundo que nos rodea —la fuerza nuclear fuerte que mantiene pegados protones y neutrones en los átomos parece completamente independiente de las fuerzas débil y electromagnética— porque cuando la temperatura cayó por debajo de 10^{28} grados otro tipo de campo de Higgs entró en la historia. Este campo de Higgs se denomina el *Higgs de gran unificación.* (Cuando quiera que pudieran confundirse, el campo de Higgs implicado en la unificación electrodébil se denomina *Higgs electrodébil.)* Similar a su primo electrodébil, el Higgs de gran unificación fluctuaba incontroladamente por encima de 10^{28} grados, pero los cálculos sugerían que se condensó en un valor no nulo cuando el universo cayó por debajo de esta temperatura. Y, como sucede con el campo electrodébil, cuando se formó

este océano de Higgs de gran unificación, el universo sufrió una transición de fase con una consiguiente reducción de simetría. En este caso, debido a que el océano de Higgs de gran unificación tiene un efecto diferente sobre los gluones que el que tiene sobre las otras partículas de fuerzas, la fuerza fuerte se desgajó de la fuerza electromagnética, dando dos fuerzas no gravitatorias distintas donde previamente había sólo una. Una fracción de segundo y un descenso de trillones de grados más tarde, el Higgs electrodébil se condensó, haciendo que también se separarán las fuerzas débil y electromagnética.

Aunque es una idea bella, la gran unificación (a diferencia de la unificación electrodébil) no ha sido confirmada experimentalmente. Por el contrario, la propuesta original de Georgi y Glashow predecía una huella, una consecuencia residual de la primitiva simetría del universo que hoy debería ser manifiesta, algo que permitiría que los protones se transmutaran de vez en cuando en otras especies de partículas (tales como antielectrones y partículas conocidas como piones). Pero tras años de laboriosa búsqueda de dicha *desintegración del protón* en sofisticados experimentos subterráneos —el experimento que Georgi me había descrito excitadamente en su despacho hacía años— no se encontró; esto descartaba la propuesta de Georgi y Glashow. No obstante, desde entonces los físicos han elaborado variantes del modelo original que no están descartadas por tales experimentos; pero hasta el momento no se ha confirmado ninguna de estas teorías alternativas.

El consenso entre los físicos es que la gran unificación es una de las grandes ideas, todavía no realizadas, de la física de partículas. Puesto que la unificación y las transiciones de fase cosmológicas se han mostrado tan potentes para el electromagnetismo y la fuerza nuclear débil, muchos

sienten que es sólo cuestión de tiempo el que otras fuerzas se unan también dentro de un marco unificado. Como veremos en el capítulo 12, se han dado grandes pasos en esta dirección utilizando una aproximación diferente —la teoría de supercuerdas— que, por primera vez, ha unido todas las fuerzas, incluyendo la gravedad, en una teoría unificada, aunque una teoría que en el momento de escribir esto todavía está en firme desarrollo. Pero lo que ya está claro, incluso considerando solamente la teoría electrodébil, es que el universo que vemos actualmente sólo muestra un remanente de la resplandeciente simetría del universo primitivo.

El retomo del éter

El concepto de ruptura de simetría, y su realización mediante el campo de Higgs electrodébil, desempeña claramente un papel central en física de partículas y en cosmología. Pero la discusión quizá le haya dejado preguntándose sobre lo siguiente: si un océano de Higgs es un algo invisible que llena lo que normalmente consideramos espacio vacío, ¿no es eso simplemente otra encarnación de la hace tiempo desacreditada noción de éter? La respuesta: sí y no. La explicación: sí, en algunos aspectos un océano de Higgs recuerda al éter. Como el éter, un campo de Higgs condensado permea el espacio, nos envuelve a todos, se filtra a través de todo lo material y, como una característica intrínseca del espacio vacío (a menos que recalentemos el universo por encima de 10^{15} grados, lo que en realidad no podemos hacer) redefine nuestra concepción de la nada. Pero a diferencia del éter original, que fue introducido como un medio invisible para transportar ondas luminosas de la misma manera que el

aire transporta ondas sonoras, un océano de Higgs no tiene nada que ver con el movimiento de la luz; no afecta de ninguna manera a la velocidad de la luz, y por eso los experimentos de finales de siglo que descartaron el éter estudiando el movimiento de la luz no guardan ninguna relación con el océano de Higgs.

Además, puesto que el océano de Higgs no tiene ningún efecto sobre nada que se mueva a velocidad constante, no selecciona un punto de vista observacional como algo especial, como hacía el éter. Por el contrario, incluso con un océano de Higgs, todos los observadores con velocidad constante siguen estando en total pie de igualdad, y por ello un océano de Higgs no entra en conflicto con la relatividad especial. Por supuesto, estas observaciones no prueban que existan los campos de Higgs; lo que muestran es que, pese a ciertas similitudes con el éter, los campos de Higgs no están en conflicto con ninguna teoría o experimento.

No obstante, si hay un océano de campos de Higgs debería tener otras consecuencias que fueran experimentalmente comprobables en los próximos años. Como ejemplo primordial, de la misma forma que los campos electromagnéticos están compuesto de fotones, los campos de Higgs están compuesto de partículas que, de forma nada sorprendente, se denominan *partículas de Higgs.* Cálculos teóricos han mostrado que si existe un océano de Higgs que permea el espacio, debería haber partículas de Higgs entre los restos de las colisiones de alta energía que tendrán lugar en el Gran Colisionador de Hadrones, un acelerador de átomos gigante que ahora está en construcción en el Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra, Suiza, y que estará operativo en 2007. Hablando en términos generales, colisiones frontales entre protones con enormes energías deberían poder sacar una partícula de Higgs del océano de Higgs de una forma

similar a como colisiones energéticas submarinas pueden sacar moléculas de H_2O del Atlántico. Con el tiempo, estos experimentos nos permitirán determinar si esta forma moderna de éter existe o si seguirá el mismo camino que su antecesora. Dirimir esta cuestión es crucial porque, como hemos visto, los campos de Higgs condensados desempeñan un papel profundo y central en nuestra formulación actual de la física fundamental.

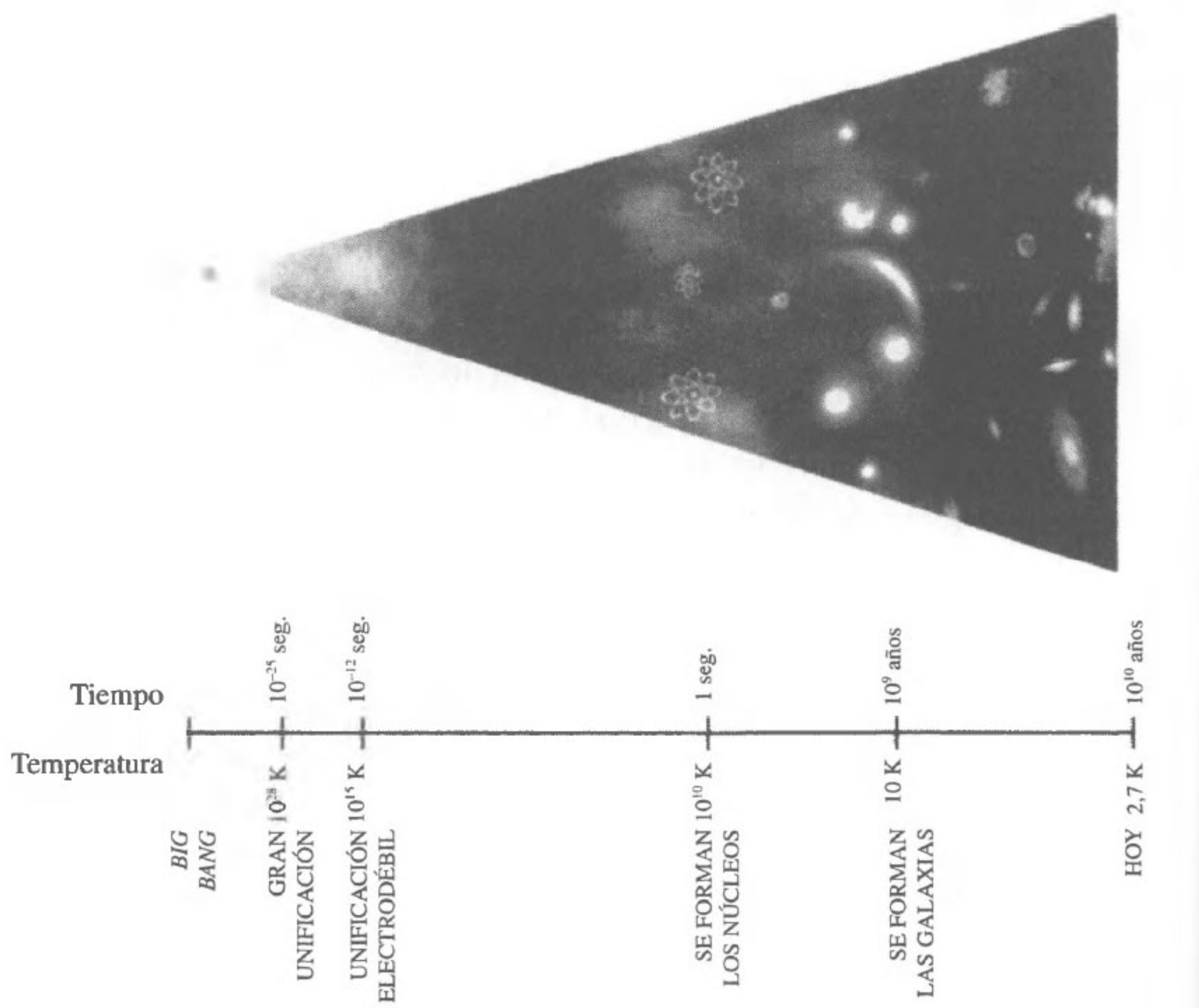


FIGURA 9.2. Una línea cronológica que ilustra esquemáticamente el modelo del big bang estándar de la cosmología.

Si no se encontrara el océano de Higgs se necesitaría un replanteamiento importante de un marco teórico que ha estado en su lugar durante más de treinta años. Pero si se encontrara, el suceso sería un éxito de la física teórica: confirmaría la potencia de la simetría para conformar correctamente nuestro razonamiento matemático cuando nos aventuramos en lo desconocido. Además de esto, la

confirmación de la existencia del océano de Higgs haría otras dos cosas. En primer lugar, ofrecería evidencia directa de una era antigua en la que varios aspectos del universo actual que parecen distintos eran parte de un todo simétrico. En segundo lugar, establecería que nuestra noción intuitiva de espacio vacío —el resultado final de eliminar todo lo que podemos de una región de modo que su energía y su temperatura se hagan lo más bajas posibles— ha sido ingenua durante mucho tiempo. El estado vacío más vacío no tiene por qué implicar un estado de nada absoluta. Por consiguiente, sin apelar a lo espiritual podemos mejorar el pensamiento de Henry More (capítulo 2) en nuestra búsqueda científica por entender el espacio y el tiempo. Para More, el concepto habitual de espacio vacío era absurdo puesto que el espacio está siempre lleno del espíritu divino. Para nosotros, el concepto habitual de espacio vacío puede ser similarmente escurridizo, puesto que el espacio vacío del que somos conscientes siempre está lleno de un océano de campo de Higgs.

Entropía y tiempo

La línea del tiempo en la figura 9.2 sitúa las transiciones de fase que hemos discutido en su contexto histórico y con ello nos da una idea más firme de la secuencia de sucesos por la que ha pasado el universo desde el *big bang* hasta el huevo en la encimera de su cocina. Pero todavía hay información crucial oculta dentro de la región borrosa. Recuerde que conocer cómo empiezan las cosas —el orden de la pila de páginas de *Guerra y paz,* las moléculas de dióxido de carbono presu- rizado en su botella de Coca-Cola, el estado del universo en el *big bang*— es esencial para entender cómo evolucionan. La entropía puede aumentar sólo si se le

da más espacio para aumentar. La entropía puede aumentar sólo si empieza baja. Si las páginas de *Guerra y paz* empiezan completamente desordenadas, lanzamientos posteriores las dejarán simplemente desordenadas; si el universo empezó en un estado completamente desordenado de alta entropía, la evolución cósmica posterior simplemente mantendría el desorden.

La historia ilustrada en la figura 9.2 no es manifiestamente una crónica de un desorden invariable y eterno. Incluso si se han perdido simetrías particulares a través de transiciones de fase cósmicas, la entropía global del universo ha aumentado continuamente. Por consiguiente, en el principio el universo debe haber estado altamente ordenado. Este hecho nos permite asociar «hacia delante» en el tiempo con la dirección de entropía creciente, pero todavía tenemos que encontrar una explicación para la entropía increíblemente baja —el estado de uniformidad increíblemente alta— del universo recién nacido. Esto requiere que retrocedamos aún más de lo que hemos hecho hasta ahora y tratemos de entender más de lo que sucedió en el principio, durante la región borrosa en la figura 9.2; una tarea a la que nos dirigimos ahora.

— 10 —

Deconstruyendo el *bang*

Qué hizo *¡bang!*

Una falsa idea muy extendida es que el *big bang* ofrece una teoría de los orígenes cósmicos. No lo hace. El *big bang* es una teoría, descrita en parte en los dos últimos capítulos, que delinea la evolución cósmica a partir de una fracción de segundo después de lo que fuera que dio nacimiento al universo, pero *no dice nada en absoluto sobre el propio instante cero.* Y puesto que, según la teoría del *big bang,* el *bang* es lo que se supone que ha sucedido en el comienzo, el *big bang* deja fuera al *bang.* No nos dice nada sobre lo que hizo *bang,* por qué hizo *bang,* cómo hizo *bang,* o, simplemente, si siquiera hizo *bang.*[10.1] De hecho, si usted lo piensa por un momento se dará cuenta de que el *big bang* nos presenta un gran rompecabezas. A las enormes densidades de materia y energía características de los primeros momentos del universo, la gravedad era con mucho la fuerza dominante. Pero la gravedad es una fuerza *atractiva.* Impulsa a las cosas a juntarse. De modo que ¿cuál sería el posible responsable de la fuerza *hacia afuera* que impulsa al espacio a expandirse? Parece que algún tipo de poderosa fuerza repulsiva tendría que haber desempeñado un papel crítico en el momento del *big bang,* pero ¿cuál de las fuerzas de la Naturaleza pudo hacerlo?

Durante muchas décadas esta pregunta, la más básica entre todas las preguntas cosmológicas, quedó sin responder. Luego, en la década de 1980, se resucitó una vieja observación de Einstein en una nueva forma, dando lugar a lo que se ha llegado a conocer como *cosmología*

inflacionaria. Y con este descubrimiento pudo atribuirse finalmente el crédito del *bang* a la fuerza que lo merecía: la gravedad. Es sorprendente, pero los físicos se dieron cuenta de que en el entorno correcto la gravedad puede ser repulsiva, y, según la teoría, las condiciones necesarias imperaban durante los primeros momentos de la historia cósmica. Durante un intervalo de tiempo que haría que un nanosegundo parezca una eternidad, el universo primitivo proporcionó un escenario en el que la gravedad ejercía su lado repulsivo con creces, alejando cada región del espacio de todas las demás con una ferocidad implacable. Tan potente era el empuje repulsivo de la gravedad que no sólo se identificó el *bang,* sino que se reveló más fuerte —mucho más fuerte— que lo que cualquiera hubiera imaginado anteriormente. En el marco inflacionario, el universo primitivo se expandió en un factor absolutamente enorme comparado con lo que predice la teoría del *big bang* estándar, lo que ampliaba nuestra visión cosmológica en una medida que eclipsaba la idea adquirida durante el último siglo de que la nuestra no es sino una galaxia entre centenares de miles de millones.**[10.2]**

En este capítulo y el siguiente discutiremos la cosmología inflacionaria. Veremos que ofrece un «frente» para el modelo del *big bang* estándar que presenta modificaciones críticas a las afirmaciones de la teoría estándar sobre lo que sucedió durante los primeros momentos del universo. Al hacerlo, la cosmología inflacionaria resuelve cuestiones clave que están más allá del alcance del *big bang* estándar, hace varias predicciones que han sido y seguirán siendo

sometidas a comprobación experimental en el próximo futuro y, quizá lo más sorprendente, muestra cómo los procesos cuánticos pueden alisar, gracias a la expansión cosmológica, minúsculas arrugas en el tejido del espacio que dejan una huella visible en el cielo nocturno. Y más allá de estos logros, la cosmología inflacionaria da una idea importante de cómo el universo primitivo puede haber adquirido su entropía extraordinariamente baja, lo que nos lleva más cerca que nunca de una explicación de la flecha del tiempo.

Einstein y la gravedad repulsiva

Después de dar los toques finales a la relatividad general en 1915, Einstein aplicó sus nuevas ecuaciones para la gravedad a una variedad de problemas. Uno de éstos, que venía de tiempo atrás, era que las ecuaciones de Newton no podían explicar la denominada precesión del perihelio de la órbita de Mercurio —el hecho observado de que Mercurio no sigue la misma trayectoria cada vez que describe una órbita alrededor del Sol: por el contrario, cada órbita sucesiva cambia ligeramente con respecto a la anterior—. Cuando Einstein rehízo los cálculos orbitales estándares con sus nuevas ecuaciones, obtuvo exactamente la precesión del perihelio observada, un resultado que encontró tan excitante que le produjo palpitaciones del corazón.[10.3] Einstein también aplicó la relatividad general a la cuestión de cómo se modificaría, debido a la curvatura del espaciotiempo, la trayectoria de la luz emitida por una estrella lejana cuando pasara cerca del Sol en su camino hacia la Tierra. En 1919, dos equipos de astrónomos —uno destinado a la isla del Príncipe en la costa occidental de África, y otro a Brasil— comprobaron su predicción durante

un eclipse solar comparando observaciones de la luz estelar que pasaba rozando la superficie del Sol (éstos son los rayos luminosos más afectados por la presencia del Sol, y sólo son visibles durante un eclipse) con fotografías tomadas cuando la Tierra se había colocado entre esas mismas estrellas y el Sol, lo que eliminaba prácticamente el impacto gravitatorio del Sol sobre la trayectoria de la luz estelar. La comparación revelaba un ángulo de curvatura que, una vez más, confirmaba los cálculos de Einstein. Cuando la prensa lanzó a los cuatro vientos el resultado, Einstein se convirtió de la noche a la mañana en una celebridad mundial. Con la relatividad general, es justo decir, Einstein tuvo una buena racha.

Pero a pesar de los éxitos acumulados de la relatividad general, años después de que aplicara por primera vez su teoría al más inmenso de todos los desafíos —comprender el universo entero— Einstein seguía negándose a aceptar la respuesta que salía de las matemáticas. Antes de los trabajos de Friedman y Lemaitre discutidos en el capítulo 8, también Einstein se había dado cuenta de que las ecuaciones de la relatividad general mostraban que el universo no podía ser estático; el tejido del espacio podía estirarse o contraerse, pero no podía mantener un tamaño fijo. Esto sugería que el universo podría haber tenido un comienzo definido, cuando el tejido estaba comprimido al máximo, y podría incluso tener un final definido. Einstein se resistía tozudamente a esta consecuencia de la relatividad general, porque él y todos los demás «sabían» que el universo era eterno y, en la mayor de las escalas, fijo e invariable. Por ello, pese a la belleza y los éxitos de la relatividad general, Einstein reabrió su cuaderno y buscó una modificación de las ecuaciones que permitieran un universo que se ajustara al prejuicio dominante. No le llevó mucho tiempo. En 1917 consiguió el objetivo introduciendo

un nuevo término en las ecuaciones de la relatividad general: la *constante cosmológica*?[10.4]

La estrategia de Einstein al introducir esta modificación no es difícil de entender. La fuerza gravitatoria entre dos objetos cualesquiera, ya sean pelotas de béisbol, planetas, estrellas, cometas, o lo que usted quiera, es atractiva, y como resultado la gravedad actúa constantemente para llevar unos objetos hacia otros. La atracción gravitatoria entre la Tierra y un bailarín que salta hacia arriba hace que el bailarín se frene, alcance una altura máxima y luego caiga de nuevo. Si un coreógrafo buscara una figura estática en la que el bailarín flote en el aire, tendría que haber una fuerza repulsiva entre el bailarín y la Tierra que equilibrara exactamente su atracción gravitatoria: una figura estática sólo puede aparecer cuando hay una cancelación perfecta entre atracción y repulsión. Einstein comprendió que exactamente el mismo razonamiento es válido para el universo entero. De la misma manera que la atracción de la gravedad actúa para frenar el ascenso del bailarín, también actúa para frenar la expansión del espacio. Y de la misma forma que el bailarín no puede conseguir el éxtasis —no puede mantenerse a una altura fija— sin una fuerza repulsiva que contrarreste la atracción normal de la gravedad, el espacio no puede ser estático —el espacio no puede mantenerse en un tamaño global fijo— sin que haya también algún tipo de fuerza repulsiva compensadora. Einstein introdujo la constante cosmológica porque descubrió incluyendo este nuevo término en las ecuaciones que la gravedad podía ofrecer precisamente dicha fuerza repulsiva.

Pero ¿qué física hay detrás de este término matemático? ¿Qué es la constante cosmológica, de qué está hecha, y cómo se las arregla para ir en contra de la gravedad atractiva normal y ejercer un empuje repulsivo hacia

afuera? Bien, la lectura moderna del trabajo de Einstein —una lectura que se remonta a Lemaitre— interpreta la constante cosmológica como una forma exótica de energía que llena de manera uniforme y homogénea todo el espacio. Digo «exótica» porque el análisis de Einstein no especificaba de dónde podría venir esta energía y, como pronto veremos, la descripción matemática a la que él apelaba aseguraba que no podía estar compuesta de nada familiar como protones, neutrones, electrones o fotones. Los físicos actuales apelan a expresiones como «la energía del propio espacio» o «energía oscura» cuando discuten el significado de la constante cosmológica de Einstein, porque si hubiera una constante cosmológica el espacio estaría lleno de una presencia amorfa y transparente que usted no sería capaz de ver directamente; el espacio lleno con una constante cosmológica seguiría pareciendo oscuro. (Esto se parece a la vieja noción de un éter y a la noción más nueva de un campo de Higgs que ha adquirido un valor no nulo en todo el espacio. La última similitud es más que mera coincidencia puesto que hay una conexión importante entre una constante cosmológica y un campo de Higgs, como veremos dentro de poco.) Pero incluso sin especificar el origen o la identidad de la constante cosmológica, Einstein fue capaz de calcular sus implicaciones gravitatorias, y la respuesta que encontró era extraordinaria.

Para entenderla, usted tiene que ser consciente de una característica de la relatividad general que todavía tenemos que discutir. En la aproximación de Newton a la gravead, la intensidad de la atracción entre dos objetos depende solamente de dos cosas: sus masas y la distancia entre ellos. Cuanto más masivos son los objetos y más próximos están, mayor es la atracción gravitatoria que se ejercen mutuamente. La situación en la relatividad general es muy parecida, excepto que las ecuaciones de Einstein muestran

que Newton se limitaba demasiado al centrar la atención en la masa. Según la relatividad general, no es sólo la masa (y la separación) de los objetos la que contribuye a la intensidad del campo gravitatorio. *Energía* y *presión*

contribuyen también. Esto es importante, de modo que dediquemos un momento a ver lo que significa.

Imagine que estamos en el siglo xxv y usted está en la Sala de los Ingenios, el más reciente experimento del Departamento Correccional que sigue un enfoque meritocrático para disciplinar a los delincuentes de cuello blanco. A cada uno de los convictos se le da un rompecabezas, y ellos sólo pueden recuperar su libertad resolviéndolo. El tipo que está en la celda contigua a la suya tiene que descubrir por qué las reposiciones de *Isla de Gilligan*[*26] tuvieron un gran éxito en el siglo xxii y ha sido el programa más popular desde entonces, de modo que es probable que él tenga que comparecer ante la Sala durante mucho tiempo. El rompecabezas que tiene que resolver usted es más sencillo. Se le dan dos cubos idénticos de oro —son del mismo tamaño y cada uno está hecho exactamente de la misma cantidad de oro—. Su desafío consiste en encontrar una manera de hacer que los cubos den pesos diferentes cuando están en reposo en una balanza fija y exquisitamente precisa, con una condición: a usted no se le permite cambiar la cantidad de materia en ninguno de los dos cubos, de forma que no hay lascas, raspaduras, limaduras, soldaduras, etc. Si usted planteara este rompecabezas a Newton, él hubiera declarado inmediatamente que no tiene solución. Según las leyes de Newton, cantidades idénticas de oro se traducen en masas idénticas, y puesto que cada cubo descansará en la misma balanza fija, la atracción gravitatoria de la Tierra sobre ellos será idéntica. Newton habría concluido que los dos cubos deberían dar un peso idéntico, en cualquier situación.

Con los conocimientos de relatividad general que ha adquirido en un instituto del siglo xxv, usted ve una salida. La relatividad general muestra que la intensidad de la atracción gravitatoria entre dos objetos no sólo depende de sus masas[10.5] (y su separación) sino también de todas y cada una de las contribuciones adicionales a la *energía* total de cada objeto. Y hasta ahora no hemos dicho nada de las temperaturas de cada uno de los cubos de oro. La temperatura es una medida de la rapidez con la que se están moviendo de un lado a otro, en promedio, los átomos de oro que constituyen cada cubo —es una medida de lo energéticos que son los átomos (refleja su energía *cinética)* —. Así, usted se da cuenta de que si calienta un cubo, sus átomos serán más energéticos, de modo que pesará un poco más que el cubo más frío. Éste es un hecho que Newton no conocía (un aumento de 10 grados Celsius aumentaría el peso de un cubo de un kilo en aproximadamente una milbillonésima de kilogramo, de modo que el efecto es minúsculo), y con esta solución usted sería puesto en libertad por la Sala.

Bueno, casi. Puesto que su crimen era particularmente tortuoso, en el último minuto la junta de libertad condicional decide que usted debe resolver un segundo rompecabezas. Se le dan dos juguetes idénticos, de esos en los que un payaso sale despedido de una caja, impulsado por un muelle, al levantar la tapa de la caja. Su nuevo reto consiste en encontrar una forma de que cada uno de ellos tenga un peso diferente. Pero esta vez no sólo se le prohíbe cambiar la cantidad de masa en cualquiera de los objetos sino que también se le exige que mantenga ambos a exactamente la misma temperatura. Una vez más, si le planteara a Newton este rompecabezas, él se resignaría inmediatamente a pasar su vida la Sala. Puesto que los juguetes tienen masas idénticas, él concluiría que sus pesos son idénticos, y por

ello el rompecabezas es irresoluble. Pero, una vez más, el conocimiento que tiene usted de la relatividad general viene en su ayuda. En uno de los juguetes usted comprime el muelle, estrujando fuertemente el payaso bajo la tapa cerrada, mientras que en el otro deja al payaso en su posición levantada. ¿Por qué? Bien, un muelle comprimido tiene más energía que uno no comprimido; usted tuvo que ejercer una fuerza para comprimir el muelle y puede ver la prueba de su trabajo porque el muelle comprimido ejerce presión haciendo que la tapa del juguete se combe ligeramente hacia afuera. Y, una vez más, según Einstein, *cualquier* energía adicional afecta a la gravedad, lo que da como resultado un peso adicional. Así, el juguete cerrado, con su muelle comprimido que ejerce presión hacia afuera, pesa un poco más que el juguete abierto, cuyo muelle no está comprimido. Esto es algo que se le habría escapado a Newton, y con ello usted se gana finalmente la libertad.

La solución al segundo rompecabezas depende de la característica sutil pero crucial de la relatividad general tras la que vamos. En el artículo en el que presentaba la relatividad general Einstein demostraba matemáticamente que la fuerza gravitatoria no sólo depende de la masa, y no sólo de la energía (tal como el calor), sino también de cualquier *presión* que pueda ejercerse. Y ésta es la física esencial que necesitamos si queremos entender la constante cosmológica. He aquí la razón. La presión dirigida hacia afuera, como la ejercida por un muelle comprimido, se denomina *presión positiva.* De forma bastante natural, la presión positiva da una contribución positiva a la gravedad. Pero, y éste es el punto crítico, hay situaciones en las que la presión en una región, a diferencia de la masa y la energía total, puede ser *negativa,* lo que significa que la presión aspira hacia adentro en lugar de empujar hacia afuera. Y aunque eso quizá no suene particularmente exótico, la

presión negativa puede dar como resultado algo extraordinario desde el punto de vista de la relatividad general: *mientras que la presión positiva contribuye a una gravedad atractiva ordinaria, la presión negativa contribuye a una gravedad «negativa», es decir, ¡a gravedad repulsiva!* **[10.6]**

Con esta contundente idea, la relatividad general de Einstein mostraba una salida a la creencia de más de doscientos años de que la gravedad es siempre una fuerza atractiva. Planetas, estrellas y galaxias, como mostró correctamente Newton, ejercen un tirón gravitatorio atractivo. Pero cuando la presión se hace importante (para la materia ordinaria en condiciones cotidianas, la contribución gravitatoria de la presión es despreciable) y, en particular, cuando la presión es negativa (para la materia ordinaria, como los protones y los electrones, la presión es positiva, y ésa es la razón por la que la constante cosmológica no puede estar compuesta de nada familiar) hay una contribución a la gravedad que hubiera conmocionado a Newton. *Es repulsiva.*

Este resultado es fundamental para mucho de lo que sigue y fácilmente es malinterpretado, de modo que permítame resaltar un punto esencial. La gravedad y la presión son dos personajes relacionados pero independientes en esta historia. Las presiones, o más exactamente las diferencias de presión, pueden ejercer sus propias fuerzas no gravitatorias. Cuando usted bucea bajo el agua, sus tímpanos pueden sentir la diferencia de presión ente el agua que les empuja desde fuera y el aire que les empuja desde el interior. Todo eso es cierto. Pero lo que ahora estamos señalando sobre presión y gravedad es completamente diferente. Según la relatividad general, la presión puede ejercer indirectamente otra fuerza —puede ejercer una fuerza gravitatoria— porque la presión

contribuye al campo gravitatorio. La presión, como la masa y la energía, es una fuente de gravedad. Y notablemente, si la presión en una región es negativa, aporta un *empuje* gravitatorio al campo gravitatorio que impregna la región, y no un tirón gravitatorio.

Esto significa que cuando la presión es negativa hay competición entre la gravedad atractiva ordinaria, que aparece de la masa y la energía ordinaria, y la gravedad repulsiva exótica, que aparece de la presión negativa. Si la presión negativa en una región es suficientemente negativa, la gravedad repulsiva dominará; la gravedad separará las cosas en lugar de juntarlas. Aquí es donde la constante cosmológica entra en la historia. El término cosmológico que Einstein añadió a las ecuaciones de la relatividad general significaría que el espacio está uniformemente lleno de energía, pero, de forma crucial, las ecuaciones muestran que esta energía tiene una presión negativa uniforme. Y lo que es más, la repulsión gravitatoria de la presión negativa de la constante cosmológica domina a la atracción gravitatoria que procede de su energía positiva, y así la gravedad repulsiva gana la competición: *una constante cosmológica ejerce una fuerza gravitatoria repulsiva global.* **[10.7]**

Para Einstein, esto era precisamente lo que recetaba el doctor. La materia y la radiación ordinaria, dispersas por el universo, ejercen una fuerza gravitatoria atractiva, lo que hace que cada región del espacio atraiga a cualquier otra. El nuevo término cosmológico, que él imaginaba como algo disperso uniformemente por el universo, ejerce una fuerza gravitatoria repulsiva, lo que hace que cada región del espacio *empuje* a cualquier otra. Escogiendo cuidadosamente el tamaño del nuevo término, Einstein encontró que podía equilibrar exactamente la fuerza gravitatoria atractiva habitual con la recién descubierta

fuerza gravitatoria repulsiva, y producir un universo estático.

Además, puesto que la nueva fuerza gravitatoria repulsiva aparece a partir de la energía y la presión en el propio espacio, Einstein encontró que su intensidad es acumulativa; la fuerza se hace más fuerte sobre mayores separaciones espaciales, puesto que más espacio Ínter-puesto significa más empuje hacia afuera. Einstein demostró que en las escalas de distancia de la Tierra o el sistema solar entero la nueva fuerza gravitatoria repulsiva es inconmensurablemente minúscula. Sólo se hace importante sobre extensiones cosmológicas enormemente mayores, preservando de este modo todos los éxitos tanto de la teoría de Newton como de su propia relatividad general cuando se aplican más cerca de casa. En resumen, Einstein encontró que podía nadar y guardar la ropa: podía mantener todas las características atractivas y experimentalmente confirmadas de la relatividad general mientras conservaba la eterna serenidad de un cosmos invariable, un cosmos que no se estaba expandiendo ni contrayendo.

Con este resultado, Einstein dio sin duda un respiro de alivio. Qué descorazonador hubiera sido si la década de investigación que había dedicado a formular la relatividad géneral diera como resultado una teoría que fuera incompatible con el universo estático aparente para cualquiera que mire el cielo nocturno. Pero como hemos visto, una docena de años más tarde la historia dio un giro brusco. En 1929, Hubble demostró que las miradas superficiales pueden ser engañosas. Sus observaciones sistemáticas revelaron que el universo *no* es estático. Se está expandiendo. Si Einstein hubiera confiado en las ecuaciones originales de la relatividad general, habría predicho la expansión del universo más de una década

antes de que se descubriera observa- cionalmente. Esto le hubiera colocado ciertamente entre los mayores descubrimientos —podría haber sido el mayor descubrimiento— de todos los tiempos. Después de conocer los resultados de Hubble, Einstein lamentó el día en que había pensado en la constante cosmológica, y cuidadosamente la borró de las ecuaciones de la relatividad general. Quería que todo el mundo olvidase este episodio lamentable, y durante muchas décadas todos lo hicieron.

Sin embargo, en la década de 1980 la constante cosmológica salió de nuevo a la superficie de una forma nueva y sorprendente y provocó uno de los cambios más dramáticos en el pensamiento cosmológico desde que nuestra especie se introdujo por primera vez en el pensamiento cosmológico.

De ranas que saltan y superenfriamiento

Si usted mira una pelota de béisbol que vuela hacia arriba, podría utilizar la ley de la gravedad de Newton (o las ecuaciones más refinadas de Einstein) para calcular su trayectoria posterior. Y si usted realizase los cálculos necesarios, tendría una sólida comprensión del movimiento de la pelota. Pero todavía quedaría una cuestión sin responder: ¿quién o qué lanzó la pelota hacia arriba en primer lugar?, ¿cómo adquirió la pelota el movimiento inicial hacia arriba cuya evolución posterior usted ha calculado matemáticamente? En este ejemplo, todo lo que se necesita generalmente para encontrar la respuesta es algo más de investigación (a menos, por supuesto, que el aspirante a las grandes ligas se dé cuenta de que la pelota dio en el parabrisas de un Mercedes aparcado). Pero una versión más

difícil de una pregunta similar se sigue de la explicación que da la relatividad general a la expansión del universo.

Las ecuaciones de la relatividad general, como mostraron originalmente Einstein, el físico holandés Willem de Sitter y, posteriormente, Friedmann y Lemaítre, permiten un universo en expansión. Pero de la misma forma que las ecuaciones de Newton no nos dicen nada sobre cómo se inició el viaje ascendente de una pelota, las ecuaciones de Einstein no nos dicen nada sobre cómo se inició la expansión del universo. Durante muchos años, los cosmólogos tomaban la expansión inicial del espacio como un dato inexplicado, y simplemente desarrollaban las ecuaciones a partir de ese dato. Esto es lo que yo quería decir antes cuando dije que el *big bang* es silencioso acerca del *bang.*

Este era el caso hasta una noche histórica en diciembre de 1979, cuando Alan Guth, un estudiante posdoctoral que trabajaba en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (ahora es profesor en el MIT), demostró que podemos hacerlo mejor. Mucho mejor. Aunque existen detalles que hoy, más de dos décadas después, todavía no están completamente resueltos, Guth hizo un descubrimiento que finalmente llenaba el silencio cosmológico proporcionando un *bang* para el *big bang,* y un *bang* que era más grande que lo que cualquiera hubiera esperado.

Guth no tenía formación como cosmólogo. Su especialidad era la física de partículas, y a finales de la década de 1970, junto con Henry Tye de la Universidad de Cornell, estaba estudiando varios aspectos de los campos de Higgs en las teorías de gran unificación. Recuerde de la discusión en el último capítulo de la ruptura espontánea de simetría que un campo de Higgs aporta la mínima energía posible a una región del espacio cuando su valor se asienta en un número no nulo particular (un número que depende

de la forma detallada de su cuenco de energía potencial). Discutimos cómo en el universo primitivo, cuando la temperatura era extraordinariamente alta, el valor de un campo de Higgs fluctuaría incontroladamente de un número a otro, como la rana en el cuenco de metal caliente que se quemaba las patas, pero cuando el universo se enfriaba, el Higgs rodaría pendiente abajo por el cuenco hasta un valor que minimizaría su energía.

Guth y Tye estudiaban las razones por las que el campo de Higgs podría retrasarse en alcanzar la configuración menos energética (el valle del cuenco en la figura 9.1c). Si aplicamos la analogía de la rana, la pregunta que Guth y Tye planteaban, era ésta: ¿qué pasa si la rana, en uno de sus primeros saltos cuando el cuenco estaba empezando a enfriarse, aterrizaba por azar en la meseta central? ¿Y qué pasa si, mientras el cuenco sigue enfriándose, la rana se mantiene en la meseta central (comiendo gusanos tranquilamente), en lugar de deslizarse hacia el valle del cuenco? O, en términos físicos, ¿qué pasa si el valor de un campo de Higgs fluctuante cayera en la meseta central del cuenco de energía y se quedara allí mientras el universo seguía enfriándose? Si esto sucede, los físicos dicen que el campo de Higgs se ha *sobreenfriado,* lo que indica que incluso si la temperatura del universo ha caído hasta el punto en donde usted hubiera esperado que el valor de Higgs se aproxime al valle de mínima energía, el campo continúa atrapado en una configuración de energía más alta. (Esto es análogo al agua altamente purificada que puede ser sobreenfriada por debajo de 0 grados Kelvin, la temperatura a la que usted hubiera esperado que se convierta en hielo, y permanece líquida porque la formación de hielo requiere pequeñas impurezas en tomo a las cuales pueda crecer el cristal.)

Guth y Tye estaban interesados en esta posibilidad porque sus cálculos sugerían que podría ser relevante para un problema (el problema del monopolo magnético)[10.8] con el que los investigadores se habían tropezado en varios intentos de gran unificación. Pero Guth y Tye advirtieron que podría haber otra implicación, y visto en retrospectiva ésa es la razón de que su trabajo se mostrase fundamental. Ellos sospechaban que la energía asociada con un campo de Higgs sobreenfriado —recuerde que la altura del campo representa su energía, de modo que el campo tiene energía cero sólo si su valor está en el valle del cuenco— podría tener un efecto sobre la expansión del universo. A primeros de diciembre de 1979, Guth siguió esta corazonada y esto es lo que encontró.

Un campo de Higgs que ha quedado atrapado en una meseta no sólo llena el espacio de energía, sino que, como Guth advirtió, también aporta una *presión negativa* uniforme. De hecho, encontró que por lo que respecta a la energía y la presión, un campo de Higgs que está atrapado en una meseta tiene las mismas propiedades que una constante cosmológica: llena el espacio de energía y presión negativas, y exactamente en las mismas proporciones que una constante cosmológica. Así que Guth descubrió que un campo de Higgs sobreenfriado tiene un efecto importante en la expansión del espacio: igual que una constante cosmológica, ejerce una fuerza gravitatoria repulsiva que impulsa al espacio a expandirse.[10.9]

En este momento, puesto que usted ya está familiarizado con la presión negativa y la gravedad repulsiva, quizá esté pensando: muy bien, es muy bonito que Guth encontrase un mecanismo físico específico para realizar la idea de Einstein de una constante cosmológica, pero, ¿y qué?, ¿qué tiene eso de importante? El concepto de una constante cosmológica había sido abandonado hacía tiempo. Su

introducción en la física no significaba otra cosa que un engorro para Einstein. ¿Por qué excitarse al redescubrir algo que había quedado desacreditado hacía más de seis décadas?

Inflación

Bien, he aquí por qué. Aunque un campo de Higgs sobreenfriado comparte ciertas características con una constante cosmológica, Guth comprendió que no son completamente idénticos. Hay dos diferencias clave —diferencias que hacen toda la diferencia.

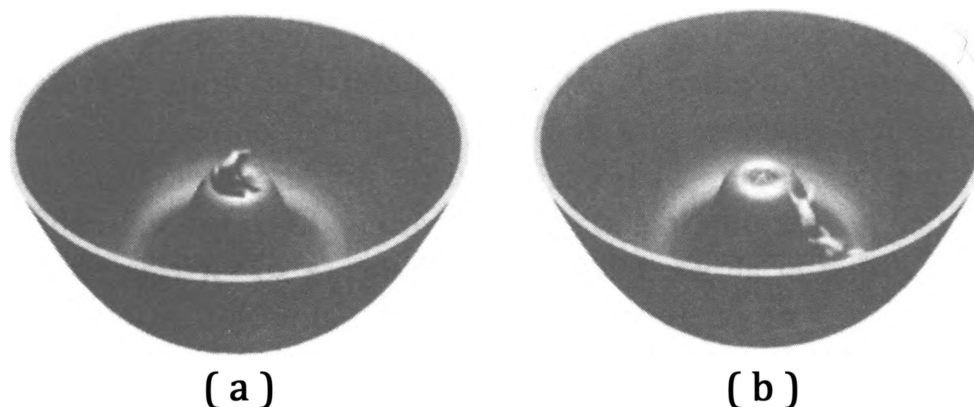


FIGURA 10.1. **(a)** Un campo de Higgs sobreenfriado es uno cuyo valor está atrapado en la meseta de alta energía del cuenco de energía, como la rana en una protuberancia, **(b)** Normalmente, un campo de Higgs sobreenfriado encontrará rápidamente su salida de la meseta y caerá a un valor con energía más baja, como el salto de la rana fuera de la protuberancia.

En primer lugar, mientras que una constante cosmológica es constante —no varía con el tiempo, de modo que proporciona un empuje hacia afuera invariable y constante— un campo de Higgs sobreenfriado no tiene por

qué ser constante. Piense en una rana posada en la protuberancia de la figura 10.1a. Puede permanecer allí durante un tiempo pero, más pronto o más tarde, un salto aleatorio a un lado u otro —un salto dado no porque el cuenco esté caliente (ya no lo está), sino simplemente porque la rana está inquieta— sacará a la rana de la protuberancia, después de lo cual deslizará hasta el punto más bajo del cuenco, como en la figura 10.1b. Un campo de Higgs puede comportarse de forma similar. Su valor en todo el espacio puede quedarse atascado en la protuberancia central de su cuenco de energía mientras la temperatura se hace demasiado baja para impulsar una agitación térmica importante. Pero los procesos cuánticos inyectarán saltos aleatorios en el valor del campo de Higgs, y un salto suficientemente grande le sacará de la meseta, permitiendo que su energía y su presión se relajen a cero.[10.10] Los cálculos de Guth demostraban que, dependiendo de la forma precisa de la protuberancia del cuenco, este salto podría haber ocurrido rápidamente, quizá en un tiempo tan corto como 0,00000000000000000000000000000000001 (10^3) segundos. Posteriormente, Andrei Linde, que entonces trabajaba en el Instituto Físico Lebedev en Moscú, y Paul Steindhart, que entonces trabajaba con su estudiante Andreas Albrecht en la Universidad de Pensilvania, descubrieron una manera de que la relajación del campo de Higgs a energía y presión nulas en todo el espacio sucediera de forma aún más eficiente y significativamente más uniforme (resolviendo con ello ciertos problemas técnicos intrínsecos en la propuesta original de Guth).[10.11] Ellos demostraron que si el cuenco de energía potencial se hubiese hecho poco a poco más suave y más inclinado, como en la figura 10.2, no habría sido necesario ningún salto cuántico: el valor del campo de Higgs hubiera rodado rápidamente hasta el valle, de forma muy parecida a como

una bola rueda cuesta abajo por una colina. El resultado es que si un campo de Higgs actuaba como una constante cosmológica, lo hacía solamente durante un breve instante.

La segunda diferencia es que mientras Einstein escogió cuidadosa y arbitrariamente el valor de la constante cosmológica —la cantidad de energía y presión negativa que aportaba a cada volumen de espacio— de modo que su fuerza repulsiva hacia afuera equilibrara exactamente la fuerza atractiva hacia adentro que surge de la materia y radiación ordinaria en el cosmos, Guth pudo estimar la energía y la presión negativa aportada por los campos de Higgs que él y Tye habían estado estudiando. Y la respuesta que encontró era más de

FIGURA 10.2. Una protuberancia más suave permitirá que el valor del campo de Higgs ruede hasta el valle de energía cero más fácilmente y más uniformemente en todo el espacio.

10000000000000000000000000000000000000000
00000000000000000000000000000000000000000
0000000000 (1O^{100}) veces mayor que el valor que Einstein había escogido. Este número es enorme, obviamente, y por ello el empuje hacia afuera suministrado por la gravedad repulsiva del campo de Higgs es monumental comparado con lo que Einstein imaginó originalmente con la constante cosmológica.

Ahora bien, si combinamos estas dos observaciones —que el campo de Higgs permanece en la meseta, en el estado de presión negativa y alta energía, sólo durante el más breve de los instantes, y que mientras está en la

meseta, el empuje repulsivo hacia afuera que genera es enorme— ¿qué tenemos? Bien, como Guth comprendió, tenemos una ráfaga expansiva de corta vida. En otras palabras, tenemos exactamente lo que le faltaba a la teoría del *big bang:* un *bang,* y uno grande. Por eso es por lo que el descubrimiento de Guth es algo que provoca excitación. **[10.12]**

La imagen cosmológica que emerge de la idea revolucionaria de Guth es entonces la siguiente. Hace mucho tiempo, cuando el universo era enormemente denso, su energía estaba transportada por un campo de Higgs asentado en un valor lejos del punto más bajo de su cuenco de energía potencial. Para distinguir este campo de Higgs particular de otros (tales como el campo de Higgs electrodébil responsable de dar masa a los tipos de partículas familiares, o el campo de Higgs que aparece en teorías de gran unificación)**[10.13]** se le denomina normalmente el campo inflatón. Debido a su presión negativa, el campo inflatón generó una repulsión gravitatoria gigantesca que impulsó a cada región del espacio a alejarse de todas las demás; en el lenguaje de Guth, el inflatón impulsó al universo a *inflarse.* La repulsión duró sólo unos 10 ’^{5} segundos, pero fue tan poderosa que incluso en ese breve momento el universo se hinchó en un factor enorme. Dependiendo de detalles tales como la forma precisa de la energía potencial del campo inflatón, el universo pudo haberse expandido fácilmente en un factor de 10^{30}, 10^{50}, o 10^{100} o más.

Estos números son espectaculares. Un factor de expansión de 10^{30} —una estimación conservadora— sería como ampliar la escala de una molécula de ADN hasta aproximadamente el tamaño de la Vía Láctea, y en un intervalo de tiempo que es mucho más corto que una milmillonésima de una trillonésima de un parpadeo. En

comparación, incluso este factor de expansión conservador es trillones de veces la expansión que hubiera ocurrido según la teoría del *big bang* estándar durante el mismo intervalo de tiempo, y supera al factor de expansión total que ha ocurrido de forma acumulativa sobre los 14.000 millones de años siguientes. En los muchos modelos de inflación en los que el factor de expansión calculado es mucho mayor que 10^{30}, la extensión espacial resultante es tan enorme que la región que podemos ver, incluso con el telescopio más potente, no es sino una minúscula fracción del universo total. Según estos modelos, ninguna de la luz emitida desde la inmensa mayor parte del universo podría habernos llegado todavía, y gran parte de ella no llegará hasta mucho después de que el Sol y la Tierra hayan muerto. Si el cosmos entero se redujera en escala hasta el tamaño de la Tierra, la parte accesible a nosotros sería mucho más pequeña que un grano de arena.

Aproximadamente 10^{-35} segundos después de que empezara la ráfaga, el campo inflatón encontró su salida de la meseta de alta energía y su valor en todo el espacio se deslizó hasta el fondo del cuenco, desactivando el empuje repulsivo. Y cuando el campo inflatón rodó hacia abajo, cedió su energía sobrante para la producción de partículas de materia ordinaria y radiación —como una niebla que se concentra en la hierba en el rocío de la mañana— que llenaron uniformemente el espacio en expansión.**[10.14]** A partir de entonces, la historia es esencialmente la de la teoría del *big bang* estándar: el espacio siguió expandiéndose y enfriándose tras la ráfaga expansiva, permitiendo que las partículas de materia se agruparan en estructuras como galaxias, estrellas y planetas que lentamente se disponían en el universo que vemos actualmente, como se ilustra en la figura 10.3.

El descubrimiento de Guth —bautizado como *cosmología inflacionaria*— junto con las importantes mejoras aportadas por Linde, y por Albrecht y Steinhardt, proporcionó una explicación para lo que desencadena la expansión del espacio. Un campo de Higgs asentado en su valor de energía cero puede proporcionar una explosión que impulsa al espacio a hincharse. Guth proporcionó un *bang* al *big bang.*

El marco inflacionario

El descubrimiento de Guth fue recibido rápidamente como un avance importante y se ha convertido en un elemento fundamental de la investigación cosmológica. Pero advierta dos cosas. En primer lugar, en el modelo del *big bang* estándar se supone que el *bang* sucedió en el instante cero, en el comienzo mismo del universo, de modo que se ve como el suceso de la creación. Pero de la misma forma que un cartucho de dinamita sólo explota cuando se prende de la manera adecuada, en la cosmología inflacionaria el *bang* ocurría solamente cuando las condiciones eran las correctas —cuando había un campo inflatón cuyo valor proporcionaba la energía y la presión negativa que alimentaba la ráfaga expansiva de la gravedad repulsiva— y eso no tenía por qué coincidir con la «creación» del universo. Por esta razón, el *bang* inflacionario es considerado como *un* suceso que experimentó el universo preexistente, pero no necesariamente como *el* suceso que creó el universo. Representamos esto en la figura 10.3 manteniendo algo de la región borrosa de la figura 9.2, lo que indica que seguimos ignorando del origen fundamental: específicamente, si la cosmología inflacionaria es correcta, ignoramos por qué hay un campo inflatón, por qué su

cuenco de energía potencial tiene la forma correcta para que haya ocurrido la inflación, por qué hay espacio y tiempo dentro del cual tiene lugar toda la discusión, y, en la ostentosa expresión de Leibniz, por qué hay algo en lugar de nada.

Una segunda observación, relacionada con la anterior, es que la cosmología inflacionaria no es una sola teoría. Más bien, es un marco cosmológico construido en tomo a la idea de que la gravedad puede ser repulsiva y puede así impulsar un hinchamiento del espacio. Los detalles precisos de la ráfaga expansiva —cuándo sucedió, cuánto duró, la intensidad del empuje, el factor en que se expandió el universo durante la ráfaga, la cantidad de energía que depositó la inflación en la materia ordinaria cuando la ráfaga finalizó, y así sucesivamente— depende de detalles, muy en especial de la forma y tamaño de la energía potencial del campo inflatón, que están actualmente más allá de nuestra capacidad de deducir a partir de consideraciones teóricas solamente. De modo que durante muchos años los físicos han estudiado todo tipo de posibilidades —varias formas para la energía potencial, varios números de los campos inflatón que funcionan en conjunto, y así sucesivamente— y han determinado qué elecciones dan lugar a teorías compatibles con las observaciones astronómicas. Lo importante es que hay aspectos de las teorías cosmológicas inflacionarias que trascienden los detalles y son comunes a prácticamente cualquier realización. La propia ráfaga expansiva, por definición, es una de estas características y por ello cualquier modelo inflacionario tiene un *bang.* Pero hay otras características inherentes a todos los modelos inflacionarios que son vitales porque resuelven problemas importantes que han desconcertado a la cosmología del *big bang* estándar.

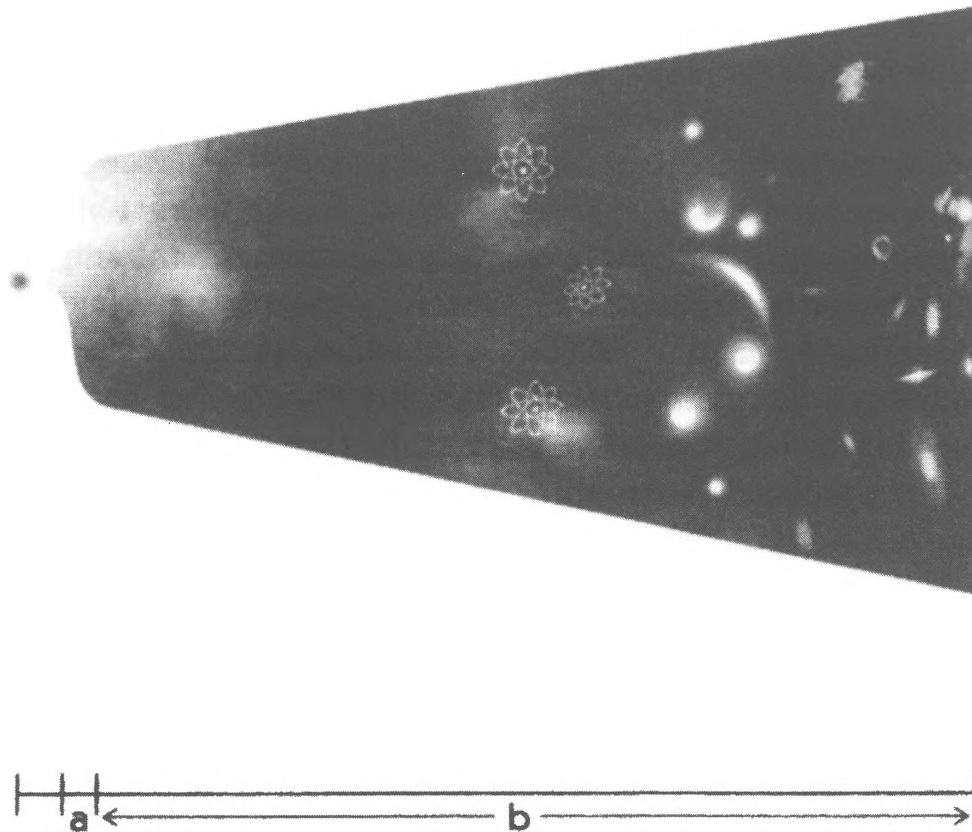


FIGURA 10.3. (a) La cosmología inflacionaria introduce una ráfaga rápida e intensa de expansión espacial en un momento temprano en la historia del universo, (b) Tras la ráfaga, la evolución del universo se empalma con la evolución estándar que predice la teoría en el modelo del *big bang.*

La inflación y el problema del horizonte

Uno de estos problemas se denomina el *problema del horizonte* y se refiere a la uniformidad de la radiación de fondo de microondas que encontramos antes. Recuerde que la temperatura de la radiación de micoondas que nos llega de una dirección del espacio coincide con la que llega desde

otra dirección con una fantástica precisión (mejor que una milésima de grado). Este hecho observacional es fundamental, porque pone de manifiesto la homogeneidad en todo el espacio, lo que permite simplificaciones enormes en los modelos teóricos del cosmos. En capítulos anteriores utilizamos esta homogeneidad para reducir drásticamente las formas posibles para el espacio y defender un tiempo cósmico uniforme. El problema aparece cuando tratamos de explicar cómo se hizo tan uniforme el universo. ¿Cómo es que regiones enormemente distantes del universo se las han arreglado para tener temperaturas prácticamente idénticas?

Si reconsidera el capítulo 3, una posibilidad es que de la misma manera que el entrelazamiento cuántico no local puede correlacionar los espines de las partículas ampliamente separadas, quizá también pueda correlacionar la temperatura de dos regiones del espacio ampliamente separadas. Aunque ésta es una sugerencia interesante, la tremenda dilución del entrelazamiento en todos los escenarios salvo los más controlados, como se discutió al final de dicho capítulo, lo descarta prácticamente. Muy bien, quizá hay una explicación más simple. Quizá hace mucho tiempo, cuando cada región del espacio estaba más próxima a todas las demás, sus temperaturas se igualaron gracias a su estrecho contacto de forma muy similar a como una cocina caliente y una sala de estar fría llegan a la misma temperatura cuando se deja abierta durante un tiempo una puerta que las separa.

Imagine que observa una película que muestra el curso completo de la evolución cósmica desde el principio hasta hoy. Pare la película en algún instante arbitrario y pregúntese: ¿podrían dos regiones particulares del espacio, como la cocina y la sala de estar, haber influido mutuamente en sus temperaturas? ¿Podrían haber

intercambiado luz y calor? La respuesta depende de dos cosas: la distancia entre las regiones y el tiempo que ha transcurrido desde el *big bang.* Si su separación es menor que la distancia que pudo recorrer la luz en el tiempo transcurrido desde el *big bang,* entonces las regiones podrían haberse influido mutuamente; en caso contrario, no podrían hacerlo. Ahora, usted podría pensar que todas las regiones del universo observable podrían haber interaccionado con todas las demás si nos remontamos hasta casi el principio, porque cuanto más hacia atrás rebobinamos la película, más se acercan las regiones y con ello es más fácil que interaccionen. Pero este razonamiento es demasiado precipitado; no tiene en cuenta el hecho de que las regiones del espacio no sólo estaban más próximas sino que también había menos tiempo para que se comunicaran. Para hacer un análisis adecuado, imagine que pasa la película cósmica al revés, aunque centrándose en dos regiones del espacio que actualmente están en lados opuestos del universo observable —regiones que están tan distantes que actualmente cada una de ellas está más allá de la esfera de influencia de la otra—. Si para reducir a la mitad su separación tenemos que rebobinar la película cósmica más de la mitad de su metraje, entonces, incluso si las regiones del espacio estaban más próximas, la comunicación entre ellas todavía era imposible: estaban a la mitad de distancia, pero el tiempo transcurrido desde el *big bang* era menos de la mitad de lo que es hoy, y por ello la luz sólo había podido recorrer menos de la mitad. Del mismo modo, si desde ese momento de la película tenemos que retroceder más de la mitad hasta el principio para reducir de nuevo a la mitad la separación entre las regiones, la comunicación se hace aún más difícil. Con este tipo de evolución cósmica, incluso si las regiones estaban más próximas en el pasado, se hace más enigmático —no menos

— que se las arreglaran de alguna manera para igualar sus temperaturas. Comparado con la distancia que la luz puede recorrer, las regiones se separan cada vez más a medida que las examinamos cada vez más atrás en el tiempo.

Esto es exactamente lo que sucede en la teoría del *big bang* estándar. En el *big bang* estándar, la gravedad actúa solamente como una fuerza atractiva, y así, desde el principio ha estado actuando para frenar la expansión del espacio. Ahora bien, si algo se está frenando, necesitará más tiempo para cubrir una distancia dada. Por ejemplo, imagine que *Secretariat*[*27] ha salido con un ritmo trepidante y ha cubierto la primera mitad de una carrera en dos minutos, pero puesto que no está en su mejor día, se frena bastante durante la segunda mitad y tarda tres minutos más en llegar a la meta. Cuando viéramos una película de la carrera al revés, tendríamos que rebobinar la película más de la mitad para ver a *Secretariat* en la marca de mitad de la carrera (habríamos tenido que rebobinar los cinco minutos de película de la carrera hasta la marca de los dos minutos). Análogamente, puesto que en la teoría del *big bang* estándar la gravedad frena la expansión del espacio, desde cualquier punto en la película cósmica tenemos que rebobinar más de la mitad en el tiempo para reducir a la mitad la separación entre las dos regiones. Y, como antes, esto significa que, incluso si las regiones del espacio estaban más próximas en tiempos anteriores, era más difícil —no menos— que se influyeran mutuamente y por ello más enigmático —no menos— que de alguna manera llegaran a la misma temperatura.

Los físicos definen el *horizonte cósmico* de una región (u *horizonte* para abreviar) como las regiones más distantes del espacio circundante que están suficientemente próximas a la región dada para que las dos hayan intercambiado señales luminosas en el tiempo transcurrido desde el *big*

bang. Es algo análogo a los objetos más distantes que podemos ver en la superficie de la Tierra desde cualquier punto de vista particular.[10.15] El problema del horizonte es, entonces, el enigma, inherente en las observaciones, que plantea el hecho de que regiones cuyos horizontes han estado siempre separados —regiones que nunca podrían haber interaccionado, comunicado o ejercido ningún tipo de influencia unas sobre otras— tienen pese a todo temperaturas casi idénticas.

El problema del horizonte no implica que el modelo del *big bang* estándar sea erróneo, pero reclama una explicación. La cosmología inflacionaria ofrece una.

En la cosmología inflacionaria había un breve instante durante el cual la gravedad era repulsiva y esto impulsó al espacio a expandirse cada vez más rápido. Durante esta parte de la película cósmica, usted tendría que rebobinar la película *menos* de la mitad para reducir a la mitad la distancia entre las dos regiones. Piense en una carrera en la que Secretaria! cubre la primera mitad de la carrera en dos minutos y, puesto que está haciendo la carrera de su vida, acelera y cubre la segunda mitad en un minuto. Usted sólo habría tenido que rebobinar la película de tres minutos de la carrera hasta la marca del minuto dos —menos de la mitad hacia atrás— para verlo en el punto medio de la carrera. Análogamente, la separación cada vez más rápida de dos regiones cualesquiera del espacio durante la expansión inflacionaria implica que reducir a la mitad su separación requiere rebobinar la película cósmica menos —mucho menos— que la mitad de su metraje. Por lo tanto, a medida que vamos más hacia atrás en el tiempo se hace *más fácil* que dos regiones cualesquiera del espacio se influyan mutuamente, porque, hablando en términos proporcionales, tienen más tiempo para comunicarse. Los cálculos muestran que si la fase de expansión inflacionaria impulsó al espacio

para expandirse en al menos un factor $1O^{30}$, una cantidad que se consigue fácilmente en simulaciones específicas de la expansión inflacionaria, todas las regiones del espacio que vemos actualmente —todas las regiones del espacio cuya temperatura hemos medido— pudieron comunicarse tan fácilmente como la cocina y la sala de estar contigua, y con ello llegar eficientemente a una temperatura común en los instantes más tempranos del universo.[10.16] En pocas palabras, el espacio se expande con suficiente lentitud al principio para que se haya establecido en general una temperatura uniforme, y luego, mediante una intensa ráfaga expansiva cada vez más rápida, el universo compensa la salida más lenta y separa ampliamente las regiones vecinas.

Así es como la cosmología inflacionaria explica la de otro modo misteriosa uniformidad de la radiación de fondo de microondas que llena el espacio.

La inflación y el problema de la planitud

Un segundo problema abordado por la cosmología inflacionaria tiene que ver con la forma del espacio. En el capítulo 8 impusimos el criterio de simetría espacial uniforme y encontramos tres maneras en que puede curvarse el tejido del espacio. Recurriendo a nuestra visualización bidimensional, las posibilidades son curvatura positiva (la forma de la superficie de una bola), curvatura negativa (forma de silla de montar) y curvatura nula (la forma de un tablero de mesa plano e infinito o de una pantalla de videojuego de tamaño finito). Desde los primeros días de la relatividad general, los físicos han entendido que la materia y la energía totales en cada volumen de espacio —la *densidad de materia/energía*—

determina la curvatura del espacio. Si la densidad de materia/energía es alta, el espacio se curva sobre sí mismo en la forma de una esfera; es decir, tendrá curvatura positiva. Si la densidad de materia/energía es baja, el espacio se vuelve hacia afuera como una silla de montar; es decir, tendrá curvatura negativa. O, como se mencionó en el último capítulo, para una cantidad muy espacial de densidad de materia/energía —la densidad crítica, igual a la masa de unos cinco átomos de hidrógeno (unos 10^{23} gramos) en cada metro cúbico— el espacio estará justo entre estos dos extremos, y será perfectamente plano: es decir, no habrá curvatura.

Ahora, el rompecabezas.

Las ecuaciones de la relatividad general, que subyacen al modelo del *big bang* estándar, muestran que si la densidad de materia/energía en el principio era *exactamente* igual a la densidad crítica, entonces permanecería igual a la densidad crítica a medida que el espacio se expandía.[10.17] Pero si la densidad de materia/energía fuera siquiera ligeramente más o ligeramente menos que la densidad crítica, la expansión posterior la alejaría enormemente de la densidad crítica. Sólo para hacerse una idea de los números, si un segundo después del *big bang* el universo estaba casi en la criticalidad, teniendo un 99,99 por 100 de la densidad crítica, los cálculos muestran que hoy su densidad se habría rebajado hasta 0,00000000001 de la densidad crítica. Esto se parece a la situación a la que se enfrenta un escalador que está caminando por una cresta estrecha con una pierna a cada lado. Si su paso es correcto, seguirá sobre ella. Pero incluso un minúsculo paso en falso hacia la izquierda o hacia la derecha será amplificado para

dar un resultado muy diferente. (Y, a riesgo de tener demasiadas analogías, esta característica del modelo estándar me recuerda también la ducha que había en el dormitorio de mi facultad hace años: si uno conseguía mantener el grifo perfectamente, podía obtener una temperatura del agua agradable. Pero si se equivocaba en lo más mínimo, en un sentido o en otro, se exponía a quedar escaldado o congelado. Algunos estudiantes dejaron de ducharse.)

Durante décadas, los físicos han estado intentando medir la densidad de materia/energía en el universo. En la década de 1980, aunque las medidas estaban lejos de ser completas, una cosa era segura: la densidad de materia/energía del universo no es miles y miles de veces más pequeña o más grande que la densidad crítica; dicho de forma equivalente, el espacio no está curvado de forma sustancial, ni positiva ni negativamente. Esto arrojaba una luz incómoda sobre el modelo del *big bang* estándar. Implicaba que para que el *big bang* estándar fuera compatible con las observaciones, algún mecanismo —uno que nadie podía explicar o identificar— debía haber ajustado la densidad materia/energía del universo primitivo en un valor *extraordinariamente* próximo a la densidad crítica. Por ejemplo, los cálculos mostraban que un segundo después del *big bang,* la densidad de materia/energía del universo tendría que haber estado a menos de *una millonésima de millonésima de un uno por 100* de la densidad crítica; si la densidad de materia/energía se desviara del valor crítico en algo más que esta minúscula cantidad, el modelo de *big bang* estándar predice para hoy una densidad de materia/energía que es enormemente diferente de la que observamos. Según el modelo del *big bang* estándar, el universo primitivo, igual que el escalador, se mantenía sobre un filo extraordinariamente estrecho.

Una minúscula desviación en las condiciones hace miles de millones de años habría llevado a un universo actual muy diferente del que revelan las medidas de los astrónomos. Esto se conoce como el *problema de la planitud.*

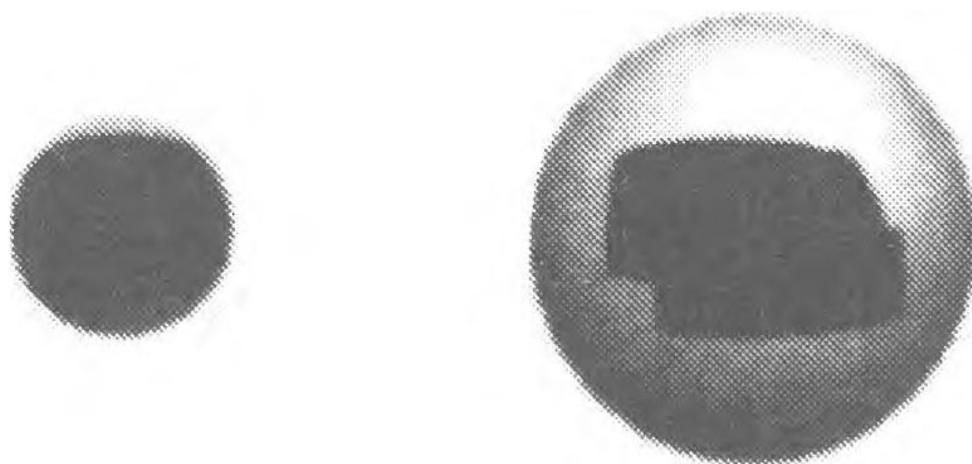
Aunque hemos cubierto la idea esencial, es importante entender en qué sentido el problema de la planitud es un problema. El problema de la planitud no prueba en modo alguno que el modelo del *big bang* estándar sea erróneo. Un creyente convencido reacciona al problema de la planitud con un encogimiento de hombros y la réplica «así es simplemente como era entonces», tomando la densidad de materia/energía finamente ajustada del universo primitivo —que el *big bang* estándar requiere para hacer predicciones que encajen con las observaciones— como un dato inexplicado. Pero esta respuesta hace retroceder a la mayoría de los físicos. Los físicos sienten que una teoría es muy poco natural si su éxito se basa en ajustes extraordinariamente precisos de las características para los que carecemos de una explicación fundamental. Sin suministrar una razón de por qué la densidad de materia/energía del universo primitivo habría estado tan finamente ajustada a un valor aceptable, muchos físicos encuentran el modelo del *big bang* estándar muy retorcido. Así pues, el problema de la pla- nitud ilustra la extrema sensibilidad del modelo del *big bang* estándar a condiciones en el pasado remoto de las que sabemos muy poco; muestra cómo debe suponer la teoría que era *exactamente* el universo para que pueda funcionar.

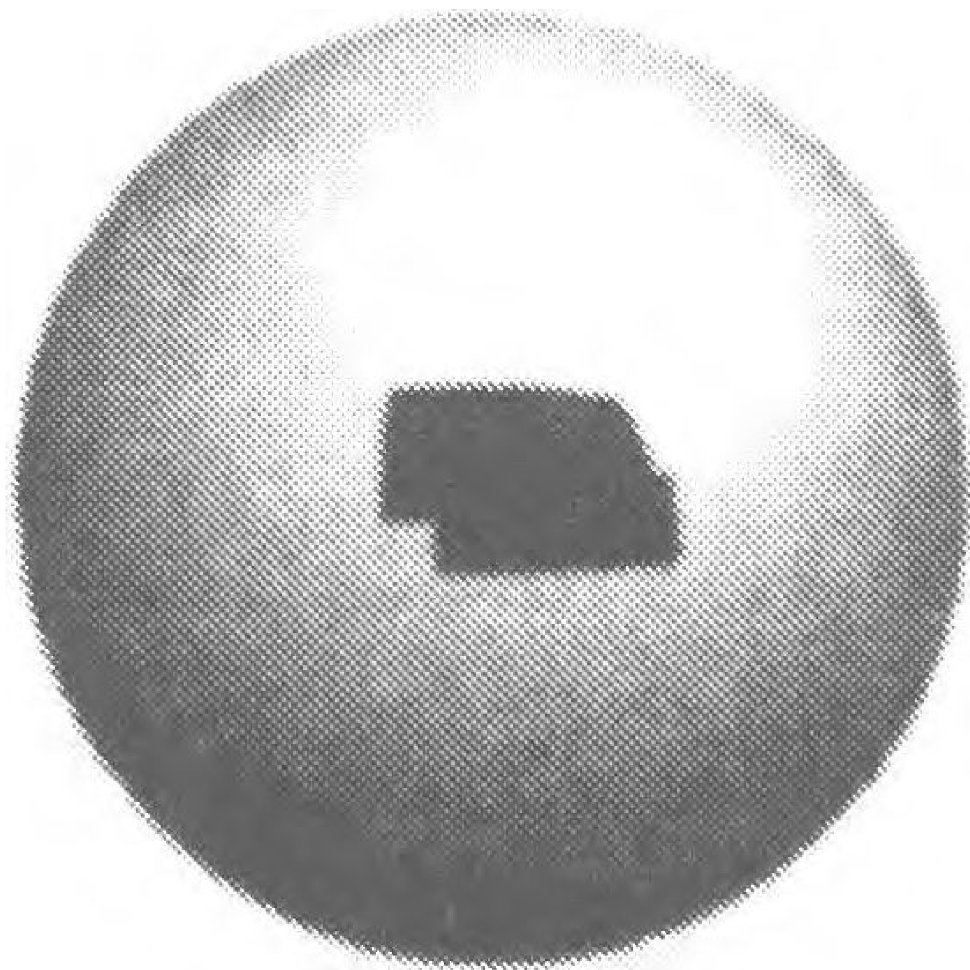
Por el contrario, los físicos desean teorías cuyas predicciones sean insensibles a cantidades desconocidas tales como el estado de las cosas hace mucho tiempo. Dichas teorías parecen robustas y naturales porque sus predicciones no dependen de detalles que son difíciles, o quizá incluso imposibles, de determinar directamente. Este

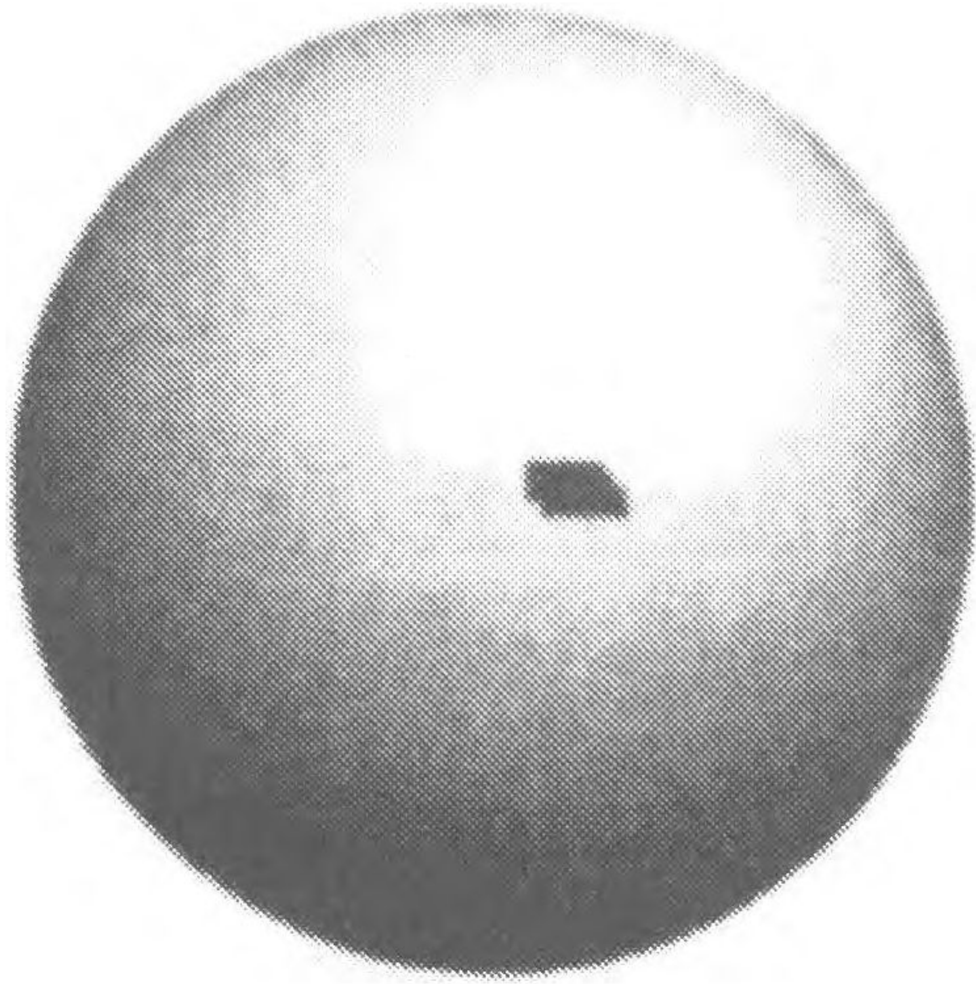
es el tipo de teoría que proporciona la cosmología inflacionaria, y su solución al problema de la planitud ilustra por qué.

La observación esencial es que mientras que la gravedad atractiva amplifica cualquier desviación respecto a la densidad de materia/energía crítica, la gravedad repulsiva de la teoría inflacionaria hace lo contrario: *reduce* cualquier desviación respecto a la densidad crítica. Para hacerse una idea de por qué es así, es más fácil utilizar la estrecha conexión entre la densidad de materia/energía del universo y su curvatura para razonar geométricamente. En particular, nótese que incluso si la forma del universo fuera significativamente curva al principio, tras la expansión inflacionaria una porción del espacio suficientemente grande para abarcar el universo observable actual parecería aproximadamente plana. Esta es una característica de la geometría que todos conocemos: la superficie de un balón de baloncesto es obviamente curva, pero se necesitó tiempo y tanteos antes de que todo el mundo se convenciera de que la superficie de la Tierra era también curva. La razón es que, si todo lo demás se mantiene igual, cuanto más grande es algo, menor es su curvatura y más plana parece una región de su superficie de un tamaño dado. Si usted dibuja el estado de Nebraska sobre una esfera de sólo algunos cientos de kilómetros de diámetro, como en la figura 10.4a, parecería curvado, pero en la superficie de la Tierra parece plano, precisamente como entienden todos los nebraskianos. Si usted extendiera Nebraska sobre una esfera mil millones de veces mayor que la Tierra, parecería más plano aún. En la cosmología inflacionaria el espacio estaba estirado en un factor tan colosal que el universo observable, la parte que podemos ver, no es sino un pequeño parche en un cosmos gigantesco. Y así, igual que sucede con Nebraska extendida

en una esfera gigante como en la figura 10.4b, el universo observable sería muy aproximadamente plano incluso si el universo entero estuviera curvado.[10.18]







(a)(b)(c)(d)

FIGURA 10.4. Una forma de tamaño fijo, tal como la del estado de Nebraska, parece cada vez más plana cuando se extiende sobre esferas cada vez mayores. En esta analogía, la esfera representa al universo entero, mientras que Nebraska representa el universo observable —la parte dentro de nuestro horizonte cósmico.

Es como si en las botas del escalador y el filo estrecho por el que camina hubiera imanes potentes y orientados en sentido opuesto. Incluso si da un paso en falso, la fuerte atracción entre los imanes asegura que sus pies seguirán correctamente en el filo. Análogamente, incluso si el

universo primitivo se desviara un poco de la densidad de materia/energía crítica y con ello estuviera lejos de ser plano, la expansión inflacionaria aseguraría que la parte del espacio a la que tenemos acceso fue *impulsada* hacia una forma plana y que la densidad de materia/energía a la que tenemos acceso fue *impulsada* al valor crítico.

Progreso y predicción

Las ideas de la cosmología inflacionaria sobre los problemas del horizonte y la planitud representan un tremendo avance. Para que la evolución cosmológica dé un universo homogéneo cuya densidad de materia/energía esté siquiera remotamente próxima a la que observamos hoy, el modelo del *big bang* estándar requiere un ajuste preciso, inexplicado y casi fantástico de las condiciones iniciales. Este ajuste puede darse por supuesto, como defienden los defensores acérrimos del *big bang* estándar, pero la falta de una explicación hace que la teoría parezca artificial. Por el contrario, independientemente de las propiedades detalladas de la densidad de materia/energía en el universo primitivo, la evolución cosmológica inflacionaria predice que la parte que podemos ver debería ser muy aproximadamente plana; es decir, predice que la densidad de materia/energía que observamos debería estar muy cerca del 100 por 100 de la densidad crítica.

La insensibilidad a las propiedades detalladas del universo primitivo es una característica maravillosa de la teoría inflacionaria, porque permite predicciones definitivas independientemente de nuestra ignorancia de las condiciones tiempo ha. Pero ahora debemos preguntar: ¿cómo apoyan estas predicciones las observaciones detalladas y precisas? ¿Apoyan los datos la predicción que

hace la cosmología inflacionaria de que deberíamos observar un universo plano que contiene la densidad de materia/energía crítica?

Durante muchos años parecía que la respuesta era «No del todo». Numerosos exámenes astronómicos midieron cuidadosamente la cantidad de materia/energía que podía verse en el cosmos, y la respuesta a que llegaron era de aproximadamente un 5 por 100 de la densidad crítica. Esto está lejos de las enormes o minúsculas densidades a las que lleva de forma natural el *big bang* estándar —sin ajuste fino artificial— y a eso es a lo que me refería antes cuando dije que las observaciones establecen que la densidad de materia/energía del universo no es miles y miles de veces mayor o menor que la cantidad crítica. Incluso así, el 5 por 100 está muy lejos del 100 por 100 que predice la inflación. Pero los físicos han comprendido hace tiempo que hay que tener cuidado al valorar los datos. Los exámenes astronómicos que dan el 5 por 100 tenían en cuenta solamente la materia y la energía que desprende luz y por ello podía verse con los telescopios de los astrónomos. Y durante décadas, incluso antes del descubrimiento de la cosmología inflacionaria, ha habido evidencia creciente de que el universo tiene un fuerte lado oscuro.

Una predicción de oscuridad

Durante los primeros años de la década de 1930, Fritz Zwicky, un profesor de astronomía del Instituto de Tecnología de California (un científico con fama de cáustico cuya apreciación de la simetría le llevó a llamar a sus colegas bastardos esféricos porque, explicaba, eran bastardos por cualquier lado que se les mirara)[10.19] se dio cuenta de que las galaxias periféricas del cúmulo Coma, un

conjunto de miles de galaxias a unos 370 millones de años luz de la Tierra, se movían demasiado rápidas para que la fuerza gravitatoria debida a toda su masa visible pudiera mantenerlas unidas al grupo. Por el contrario, su análisis demostraba que muchas de las galaxias con movimiento más rápido deberían desprenderse del cúmulo como se desprenden gotas de agua de una rueda de bicicleta que gira. Y pese a todo ninguna se desprendía. Zwicky conjeturó que podría haber materia adicional en el cúmulo que no emitía luz pero proporcionaba la atracción gravitatoria adicional necesaria para mantener al cúmulo unido. Sus cálculos demostraban que si esta explicación era correcta, la inmensa mayoría de la masa del cúmulo estaría formada por este material no luminoso. En 1936, Sinclair Smith, del observatorio del Monte Wilson, que estaba estudiando el cúmulo Virgo, encontró evidencia que lo corroboraba y llegó a conclusiones similares. Pero puesto que en las observaciones de ambos, así como en otras posteriores, había varias incertidumbres, muchos siguieron sin convencerse de que había una voluminosa materia invisible cuya atracción gravitatoria estaba manteniendo agrupadas a las galaxias.

Durante los treinta años siguientes siguió acumulándose evidencia observacional a favor de materia no luminosa, **[10.20]** pero fue el trabajo de la astrónoma Vera Rubín de la Institución Camegie de Washington, junto con Kent Ford y otros, el que realmente resolvió el caso. Rubín y sus colaboradores estudiaron el movimiento de estrellas dentro de numerosas galaxias en rotación y concluyeron que si lo que se ve es lo que hay, entonces muchas de las estrellas de las galaxias deberían salir despedidas continuamente. Sus observaciones demostraron concluyentemente que la materia galáctica visible no podía ejercer un tirón gravitatorio suficientemente fuerte para impedir que se

desprendan las estrellas de movimiento más rápido. Sin embargo, sus análisis detallados demostraban también que las estrellas permanecerían unidas gravitatoriamente si las galaxias en las que habitaban estuvieran inmersas en una bola gigante de materia no luminosa (como en la figura 10.5), cuya masa total superara con mucho la masa del material luminoso de la galaxia. Y así, de la misma forma que los espectadores en un teatro infieren la presencia de un mimo vestido de negro incluso si solamente ven sus manos con guantes blancos revoloteando en un escenario oscuro, los astrónomos concluyeron que el universo debe estar lleno de *materia oscura* —materia que no se condensa en estrellas y por ello no emite luz, y que así ejerce una atracción gravitatoria sin revelarse visiblemente—. Los constituyentes luminosos del universo —estrellas— se revelaron como boyas flotando en un océano gigante de materia oscura.

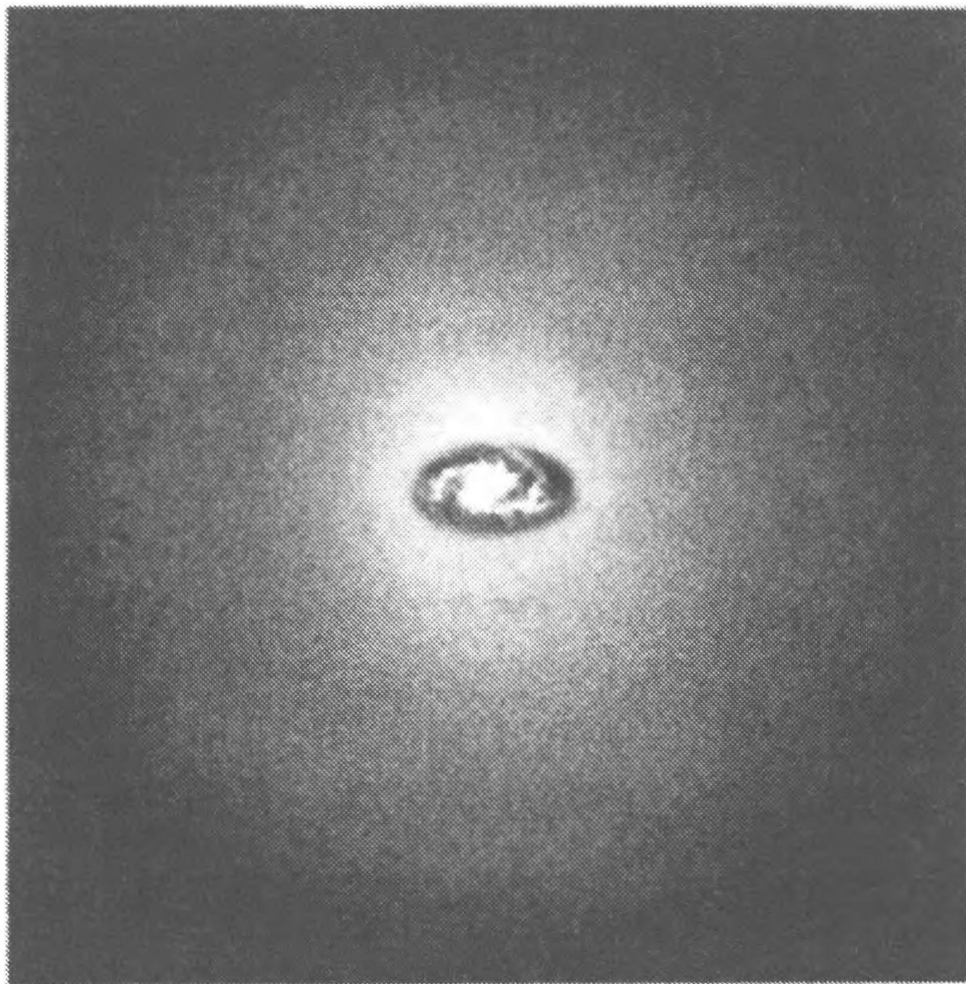


FIGURA 10.5. Una galaxia inmersa en una bola de materia oscura (con la materia oscura artificialmente resaltada para hacerla visible en la figura).

Pero si la materia oscura debe existir para producir los movimientos observados de estrellas y galaxias, ¿de qué está hecha? Hasta ahora, nadie lo sabe. La identidad de la materia oscura sigue siendo un misterio amenazador, aunque astrónomos y físicos han sugerido numerosos constituyentes posibles que van desde varios tipos de partículas exóticas hasta un baño cósmico de agujeros

negros en miniatura. Pero incluso sin determinar su composición, analizando cuidadosamente sus efectos gravitatorios los astrónomos han podido determinar con gran precisión cuánta materia oscura hay dispersa por el universo. Y la respuesta que han encontrado equivale a aproximadamente un 25 por 100 de la densidad crítica. **[10.21]** Así, junto con el 5 por 100 encontrado en la materia visible, la materia oscura eleva nuestra cuenta hasta el 30 por 100 de la cantidad predicha por la cosmología inflacionaria.

Bien, esto es ciertamente un progreso, pero durante mucho tiempo los científicos se rascaron la cabeza preguntándose cómo dar cuenta del 70 por 100 restante del universo, que, si la cosmología inflacionaria era correcta, se había ausentado sin permiso. Pero luego, en 1998, dos grupos de astrónomos llegaron a la misma conclusión sorprendente, que hace que nuestra historia cierre el círculo y revela una vez más la perspicacia de Albert Einstein.

El universo desbocado

De la misma forma que usted puede buscar una segunda opinión para confirmar un diagnóstico médico, también los físicos buscan segundas opiniones cuando tienen datos o teorías que apuntan a resultados enigmáticos. De estas segundas opiniones, las más convincentes son las que llegan a la misma conclusión desde un punto de vista que difiere drásticamente del análisis original. Cuando las flechas explicato- rias convergen en un punto desde ángulos diferentes hay una buena probabilidad de que estén apuntando en la buena dirección. Era natural entonces, teniendo en cuenta que la cosmología inflacionaria suge-

ría algo muy extraño —que el 70 por 100 de la masa/energía del universo tiene aún que ser medida o identificada— que los físicos desearan una confirmación independiente. Se sabía desde hacía tiempo que las medidas del *parámetro de deceleración* servirían para este propósito.

Desde inmediatamente después de la ráfaga inflacionaria inicial, la gravedad atractiva ordinaria ha estado frenando la expansión del espacio. El ritmo al que ocurre este frenado se denomina parámetro de deceleración. Una medida precisa del parámetro proporcionaría una idea independiente sobre la cantidad total de materia en el universo: más materia, ya emita luz o no, implica una mayor atracción gravitatoria y con ello un frenado más pronunciado de la expansión espacial.

Durante muchas décadas, los astrónomos han estado tratando de medir la deceleración del universo, pero aunque hacerlo es simple en teoría, es un reto en la práctica. Cuando observamos cuerpos celestes lejanos tales como galaxias o cuásares los estamos viendo tal como eran hace mucho tiempo: cuanto más lejos están, más atrás en el tiempo estamos mirando. Por eso, si pudiéramos medir con qué rapidez se están alejando de nosotros, tendríamos una medida de con qué rapidez se estaba expandiendo el universo en el pasado lejano. Además, si pudiéramos llevar a cabo tales medidas para objetos astronómicos situados a distancias muy diferentes, habríamos medido el ritmo de expansión del universo en momentos muy diferentes en el pasado. Comparando estos ritmos de expansión, podríamos determinar cómo se está frenando en el tiempo la expansión del espacio y determinar así el parámetro de deceleración.

Así pues, llevar a cabo esta estrategia para medir el parámetro de deceleración requiere dos cosas: un medio de

determinar la distancia a un objeto astronómico dado (de modo que sepamos cuánto atrás en el tiempo estamos mirando) y un medio de determinar la velocidad con la que el objeto se está alejando de nosotros (de modo que sepamos el ritmo de la expansión espacial en ese instante en el pasado). El último ingrediente es más fácil de obtener. De la misma forma que el tono de la sirena de un coche de la policía desciende a tonos más bajos cuando se aleja rápidamente de nosotros, la frecuencia de vibración de la luz emitida por una fuente astronómica también desciende cuando el objeto se aleja. Y puesto que la luz emitida por átomos como los de hidrógeno, helio y oxígeno —átomos que están entre los constituyentes de estrellas, cuásares y galaxias— ha sido cuidadosamente estudiada en condiciones de laboratorio, puede hacerse una determinación precisa de la velocidad del objeto examinando cómo difiere la luz que recibimos de éste de la luz que vemos en el laboratorio.

Pero el primer ingrediente, un método para determinar exactamente la distancia a la que está un objeto ha sido un dolor de cabeza para el astrónomo. Cuanto más lejos está algo, más tenue esperamos que se vea, pero convertir esta simple observación en una medida cuantitativa es difícil. Para estimar la distancia a un objeto por su brillo aparente usted necesita saber su brillo intrínseco —cómo brillaría si estuviese cerca de usted—. Y es difícil determinar el brillo intrínseco de un objeto a miles de millones de años luz. La estrategia general consiste en buscar un tipo de cuerpos celestes que, por razones astrofísicas fundamentales, siempre se consumen con un brillo estándar. Si el espacio estuviera salpicado de bombillas brillantes de 100 vatios, eso serviría, puesto que podríamos determinar fácilmente la distancia a una bombilla dada basándonos en lo tenue que se ve (aunque sería un reto ver bombillas de 100 vatios muy

alejadas). Pero puesto que el espacio no está dotado de ellas, ¿qué puede desempeñar el papel de bombillas con brillo estándar o, en la jerga astronómica, qué puede desempeñar el papel de *candelas estándar!* Durante años los astrónomos han estudiado varias posibilidades, pero la can- didata más satisfactoria hasta la fecha es una clase particular de explosiones de supernova.

Cuando las estrellas agotan su combustible nuclear, la presión hacia afuera originada por la fusión nuclear en el corazón de la estrella disminuye y la estrella empieza a implosionar bajo su propio peso. Cuando el corazón de la estrella se aplasta sobre sí mismo, su temperatura aumenta rápidamente, lo que a veces produce una enorme explosión que desprende las capas externas de la estrella en una brillante exhibición de fuegos artificiales celestes. Dicha explosión se conoce como una supernova; durante algunas semanas, una simple estrella que explota puede verse tan brillante como mil millones de soles. Esto es verdaderamente desconcertante: ¡una única estrella tan brillante como casi toda una galaxia! Diferentes tipos de estrellas —de diferentes tamaños, con diferentes abundancias atómicas y demás— dan lugar a diferentes tipos de explosiones de supernova, pero durante muchos años los astrónomos se han dado cuenta de que ciertas explosiones de supernova siempre parecen tener el mismo brillo intrínseco. Éstas son las explosiones de supernova *tipo la.*

En una supernova tipo la, una estrella enana blanca —una estrella que ha agotado su suministro de combustible nuclear pero tiene una masa insuficiente para producir por sí misma una explosión de supernova— absorbe el material de la superficie de una estrella acompañante próxima. Cuando la masa de la estrella enana alcanza un valor crítico particular, aproximadamente 1,4 veces la masa del Sol,

sufre una reacción nuclear desbocada que hace que la estrella pase a supernova. Puesto que tales explosiones de supernova ocurren cuando la estrella enana alcanza la misma masa crítica, las características de la explosión, incluyendo su brillo intrínseco global, son básicamente las mismas de un episodio a otro. Además, puesto que las supernovas, a diferencia de las bombillas de 100 vatios, son tan fantásticamente potentes, no sólo tienen un brillo estándar sino que también pueden verse de forma clara a través del universo. Son así candidatas principales para candelas estándar.[10.22]

En la década de 1990, dos grupos de astrónomos, uno dirigido por Saúl Perlmutter en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, y el otro dirigido por Brian Schmidt en la Universidad Nacional Australiana, se propusieron determinar la deceleración —y con ello la masa/energía total— del universo midiendo las velocidades de recesión de supernovas tipo la. Identificar una supernova de tipo la es bastante simple porque la luz que genera su explosión sigue una pauta característica de ascenso rápido para disminuir luego poco a poco en intensidad. Pero captar una supernova tipo la en el momento exacto de producirse no es pequeña hazaña, puesto que sólo ocurren aproximadamente una vez cada algunos cientos de años en una galaxia típica. No obstante, gracias a la técnica innovadora de observar simultáneamente miles de galaxias con telescopios de amplio campo de visión, los equipos pudieron encontrar casi cuatro docenas de supernovas de tipo la a varias distancias de la Tierra. Después de determinar laborío- sámente las distancias y velocidades de recesión de cada una, ambos grupos llegaron a un conclusión completamente inesperada: desde que el universo tenía unos 7.000 millones de años, su ritmo de expansión no ha estado decelerándose. Por el contrario, el ritmo de expansión ha estado *acelerándose.*

Los grupos concluyeron que la expansión del universo se frenó durante los primeros 7.000 millones de años tras la ráfaga inicial, de forma muy parecida a como un automóvil se frena cuando se acerca al peaje de una autopista. Esto era lo esperado. Pero los datos revelaban que, como un conductor que aprieta el pedal del acelerador después de pasar por la cabina de pago, la expansión del universo ha estado acelerándose desde entonces. El ritmo de expansión del espacio 7.000 millones de años después del *bang* era menor que el ritmo de expansión 8.000 millones de años después del *bang,* que era menor que el ritmo de expansión 9.000 millones de años después del *bang,* y así sucesivamente, todos lo cuales son menores que el ritmo de expansión hoy. La deceleración esperada de la expansión espacial ha resultado ser una *aceleración* inesperada.

Pero ¿cómo podía ser esto? Bien, la respuesta ofrece la segunda opinión corroboradora con respecto al 70 por 100 ausente de la masa/energía que los físicos habían estado buscando.

El 70 por 100 ausente

Si mira atrás a 1917 ya la introducción por Einstein de la constante cosmológica, tiene información suficiente para sugerir cómo sería posible que el universo se estuviera acelerando. La materia y la energía ordinarias producen gravedad atractiva ordinaria, que frena la expansión espacial. Pero a medida que el universo se expande y las cosas se diluyen cada vez más, esta atracción gravitatoria cósmica, aunque sigue actuando para frenar la expansión, se hace más débil. Y esto nos lleva a un giro nuevo e inesperado. Si el universo tuviera una constante cosmológica —y si su magnitud tuviera el valor pequeño—

su repulsión gravitatoria hubiese quedado abrumadoramente superada por la atracción gravitatoria normal de la materia ordinaria correcta hasta aproximadamente siete mil millones de años después del *bang,* dando un frenado neto de la expansión en consonancia con los datos. Pero luego, a medida que la materia ordinaria se dispersaba y su atracción gravitatoria disminuía, el empuje repulsivo de la constante cosmológica (cuya intensidad no cambia cuando la materia se dispersa) habría ganado gradualmente la mano, y *la era de expansión espacial decelerada habría dado paso a una nueva era de expansión acelerada.*

A finales de la década de 1990, este razonamiento y un análisis en profundidad de los datos llevó tanto al grupo de Perlmutter como al grupo de Schmidt a sugerir que Einstein no se había equivocado ocho décadas antes cuando introdujo una constante cosmológica en las ecuaciones gravitatorias. El universo, sugirieron, tiene una constante cosmológica.**[10.23]** Su magnitud no es la que Einstein propuso, puesto que él buscaba un universo estático en el que la atracción y la repulsión gravitatoria se compensaran exactamente, y estos investigadores encontraron que durante miles de millones de años ha dominado la repulsión. Pero independientemente de los detalles, si el descubrimiento de estos grupos siguiera superando el examen profundo y los estudios posteriores que hay ahora en curso, ello querría decir que, una vez más, Einstein había visto una característica fundamental del universo, una característica que esta vez necesitó más de ochenta años para ser confirmada experimentalmente.

La velocidad de recesión de una supernova depende de la diferencia entre la atracción gravitatoria de la materia ordinaria y el empuje gravitatorio de la «energía oscura» suministrado por la constante cosmológica. Considerando

que la cantidad de materia, visible y oscura, es de aproximadamente un 30 por 100 de la densidad crítica, los investigadores de supernovas concluyeron que la expansión acelerada que habían observado requería un empuje hacia afuera de una constante cosmológica cuya energía oscura aporta aproximadamente el 70 por 100 de la densidad crítica.

Éste es un número extraordinario. Si es correcto, no sólo la materia ordinaria —protones, neutrones, electrones— constituye apenas un raquítico 5 por 100 de la masa/energía del universo, y no sólo la forma actualmente no identificada de materia oscura constituye al menos *cinco veces* esa cantidad, sino que también la mayoría de la masa/energía en el universo es aportada por una forma completamente diferente y más bien misteriosa de energía oscura que está distribuida por el espacio. Si estas ideas son correctas, amplían de forma espectacular la revolución copemicana: no sólo no somos el centro del universo, sino que la materia de la que estamos hechos es una especie de restos flotantes en el océano cósmico. Si protones, neutrones y electrones hubieran quedado fuera del gran diseño, la masa/energía total del universo apenas hubiera disminuido.

Pero hay una segunda razón igualmente importante por la que el 70 por 100 es un número extraordinario. Una constante cosmológica que aporta el 70 por 100 de la densidad crítica, junto con el 30 por 100 procedente de la materia ordinaria y la materia oscura, elevaría la masa/energía total del universo hasta el 100 por 100 predicho por la cosmología inflacionaria. Así pues, el empuje hacia afuera puesto de manifiesto por los datos de supernovas puede explicarse precisamente por la cantidad correcta de energía oscura necesaria para dar cuenta del 70 por 100 invisible del universo que los cosmólogos

inflacionarios habían estado buscando. Las medidas de supernovas y la cosmología inflacionaria son maravillosamente complementarias. Cada una de ellas confirma la otra. Cada una proporciona una segunda opinión corroboradora para la otra.[10.24]

Combinando los resultados observacionales de las supernovas con las ideas teóricas de la inflación llegamos al siguiente esbozo de la evolución cósmica, resumido en la figura 10.6. Inicialmente la energía del universo era transportada por el campo inflatón, que estaba fuera de su estado de mínima energía. Debido a su presión negativa, el campo inflatón desencadenó una intensa ráfaga de expansión inflacionaria. Luego, unos 10^{35} segundos más tarde, cuando el campo inflatón se deslizó hacia abajo por su cuenco de energía potencial, la ráfaga de expansión llegó a su fin y el inflatón liberó su energía sobrante para la producción de materia y radiación ordinarias. Durante muchos miles de millones de años, estos constituyentes familiares del universo ejercieron una atracción gravitatoria ordinaria que frenó la expansión espacial. Pero a medida que el universo crecía y se enrarecía, la atracción gravitatoria disminuyó. Hace aproximadamente 7.000 millones de años la atracción gravitatoria ordinaria se hizo suficientemente débil para que la repulsión gravitatoria de la constante cosmológica del universo se hiciera dominante, y desde entonces el ritmo de expansión espacial ha estado creciendo continuamente.

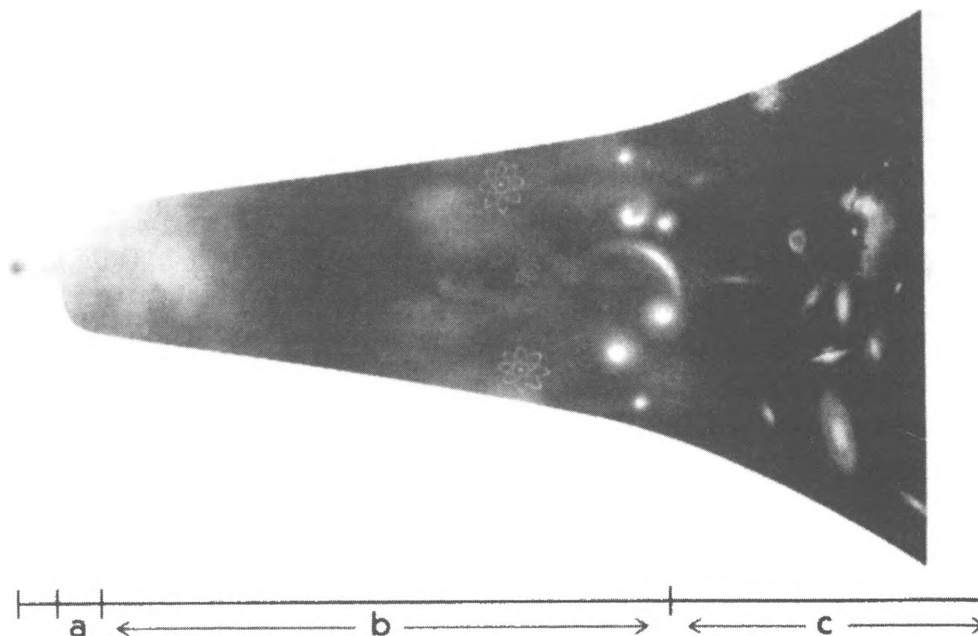


FIGURA 10.6. Una línea cronológica de evolución cósmica, (a) Ráfaga inflacionaria. **(b)** Evolución *big bang* estándar, **(c)** Era de expansión acelerada.

Aproximadamente 100.000 millones de años a partir de ahora, todas las galaxias salvo las más próximas serán arrastradas por el hinchamiento del espacio a velocidad más rápida que la luz y así sería imposible que las viéramos, independientemente de la potencia de los telescopios utilizados. Si estas ideas son correctas, en el futuro lejano el universo será un lugar enorme, vacío y solitario.

Interrogantes y progresos

Con estos descubrimientos parecía evidente que las piezas del rompecabezas cosmológico estaban encajando. Las preguntas que dejaba sin respuesta la teoría del *big bang*

estándar —¿qué desencadenó el hin- chamiento del espacio?, ¿por qué es tan uniforme la temperatura de la radiación de fondo de microondas? , ¿por qué el espacio parece tener una forma plana?— eran abordadas por la teoría inflacionaria. Incluso así, se han seguido acumulando las cuestiones espinosas respecto a los orígenes fundamentales: ¿hubo una era antes de la ráfaga inflacionaria, y si la hubo, cómo fue?, ¿qué introdujo un campo inflatón desplazado de su configuración de mínima energía para iniciar la expansión inflacionaria? Y, la pregunta más reciente de todas, ¿por qué está el universo aparentemente compuesto de tal mezcla de ingredientes —5 por 100 de materia familiar, 25 por 100 de materia oscura, 70 de energía oscura?—. A pesar del hecho enormemente gratificante de que esta receta cósmica coincide con la predicción de la inflación de que el universo debería tener un 100 por 100 de la densidad crítica, y aunque simultáneamente explica la expansión acelerada encontrada en los estudios de supernova, muchos físicos consideran esta mezcolanza muy poco atractiva. ¿Por qué, se han preguntado muchos, la composición del universo ha resultado ser tan complicada? ¿Por qué hay un puñado de ingredientes dispares con abundancias tan aparentemente aleatorias? ¿Hay algún plan subyacente razonable que los estudios teóricos aún no han revelado?

Nadie ha adelantado ninguna respuesta convincente a estas preguntas; están entre los problemas de investigación apremiantes que impulsan la investigación cosmológica actual y sirven para recordarnos muchos de los nudos entrelazados que aún debemos desenredar antes de que podamos afirmar que hemos entendido por completo el nacimiento del universo. Pero a pesar de los desafíos importantes que quedan, la inflación sigue en la vanguardia de la teoría cosmológica. Por supuesto, la creencia de los

físicos en la inflación está basada en los logros que hemos discutido hasta ahora. Pero la confianza en la cosmología inflacionaria tiene raíces aún más profundas. Como veremos en el próximo capítulo, otras consideraciones —procedentes de descubrimientos tanto teóricos como observacionales— han convencido a muchos físicos que trabajan en el campo de que el marco inflacionario es la contribución más importante y más duradera de nuestra generación a la ciencia cosmológica.

CUARTA PARTE

Orígenes y unificación

— 11 —

Los cuantos en el cielo con diamantes

Inflación, agitaciones cuánticas y la flecha del tiempo

El descubrimiento del marco inflacionario abrió una nueva era en la investigación cosmológica, y en las décadas transcurridas desde entonces se han escrito muchos miles de artículos sobre el tema. Los científicos han explorado cada rincón y resquicio de la teoría que usted pudiera imaginar. Aunque muchos de estos trabajos se han centrado en detalles de importancia técnica, otros han ido más lejos y han mostrado cómo la inflación no sólo resuelve problemas cosmológicos específicos fuera del alcance del *big bang* estándar sino que también proporciona nuevas y potentes aproximaciones a varias cuestiones antiguas. De éstas, hay tres desarrollos —que tienen que ver con la formación de estructuras agrupadas tales como galaxias; la cantidad de energía requerida para generar el universo que vemos; y (de importancia primordial para nuestra historia) el origen de la flecha del tiempo— en la que la inflación ha sido preludio de un progreso sustancial y, algunos dirían, espectacular.

Escritura celeste cuántica

La solución de la cosmología inflacionaria a los problemas del horizonte y de la planitud fue su paso inicial a la fama. Como hemos visto, éstos fueron logros importantes. Pero en los años transcurridos desde entonces, muchos físicos han llegado a creer que otros logros de

la inflación comparten el número uno de la lista de contribuciones más importantes de la teoría.

La idea alabada concierne a una cuestión que, hasta este momento, no le he animado a considerar: ¿Cómo es que hay galaxias, estrellas, planetas y otros objetos compactos en el universo? En los tres últimos capítulos le pedí que se centrara en escalas astronómicamente grandes —escalas en las que el universo parece homogéneo, escalas tan grandes que galaxias enteras pueden considerarse como simples moléculas de H_2O mientras que el propio universo es el vaso de agua entero—. Pero antes o después la cosmología tiene que enfrentarse al hecho de que cuando se examina el cosmos en escalas «más finas» se descubren estructuras compactas como galaxias. Y aquí, una vez más, nos enfrentamos a un rompecabezas.

Si el universo es realmente suave, uniforme y homogéneo a grandes escalas —características que están apoyadas por la observación y que están en el corazón de todos los análisis cosmológicos— ¿de dónde pudo proceder la existencia de grumos en escalas más pequeñas? El creyente acérrimo en la cosmología del *big bang* estándar puede, una vez más, no darle importancia a esta cuestión apelando a condiciones altamente favorables y misteriosamente ajustadas en el universo primitivo. «Casi en el mismo principio», podría decir ese creyente, «las cosas eran, más o menos, suaves y uniformes, pero no *perfectamente* uniformes. No puedo decir cómo se dieron esas condiciones. Sencillamente eran así. Con el tiempo, esta minúscula gra- nulosidad creció, puesto que un grumo

tiene mayor atracción gravitatoria, al ser más denso que su entorno, y por eso captura más material vecino y se hace aún mayor. Finalmente, los grumos se hacen suficientemente grandes para formar estrellas y galaxias.» Ésta sería una historia convincente si no fuera por dos deficiencias: la total carencia de una explicación para la homogeneidad global inicial y para estas importantes y minúsculas no uniformidades. Aquí es donde la cosmología inflacionaria proporciona un avance satisfactorio. Ya hemos visto que la inflación ofrece una explicación para la uniformidad a gran escala, y como aprenderemos ahora, el poder ex- plicatorio de la teoría va aún más lejos. Según la cosmología inflacionaria, la no uniformidad inicial que dio como resultado final la formación de estrellas y galaxias tuvo su origen en la *mecánica cuántica.*

Esta magnífica idea sale de un contacto entre dos áreas de la física aparentemente dispares: la expansión inflacionaria del espacio y el principio de incertidumbre cuántico. El principio de incertidumbre nos dice que siempre hay compromisos en la precisión con que pueden determinarse varias características físicas complementarias en el cosmos. El ejemplo más familiar (ver el capítulo 4) implica a la materia: cuanto más precisamente se determina la posición de una partícula, con menos precisión puede determinarse su velocidad. Pero el principio de incertidumbre también se aplica a los campos. Por un razonamiento esencialmente idéntico al que utilizamos en su aplicación a las partículas, el principio de incertidumbre implica que cuanto más precisamente se determina el valor de un campo en una localización en el espacio, con menos precisión puede determinarse su ritmo de cambio en ese lugar. (La posición de una partícula y la velocidad de cambio de su posición —su velocidad— desempeñan en mecánica cuántica papeles idénticos al valor de un campo y la

velocidad de cambio del valor del campo en una localización dada en el espacio.)

Me gusta resumir el principio de incertidumbre diciendo, en términos generales, que la mecánica cuántica hace las cosas agitadas y turbulentas. Si la velocidad de una partícula no puede determinarse con total precisión, tampoco podemos determinar dónde estará localizada la partícula siquiera una fracción de segundo más tarde, puesto que la velocidad *ahora* determina la posición *luego.* En cierto sentido, la partícula es libre para adoptar esta o esa velocidad o, más exactamente, asumir una mezcla de muchas velocidades diferentes, y con ello agitarse frenéticamente, yendo al azar de un lado a otro. En el caso de los campos, la situación es similar. Si la velocidad de cambio de un campo no puede determinarse con total precisión, entonces no podemos determinar cuál será el valor del campo, en ningún lugar, ni siquiera un momento después. En cierto sentido, el campo ondulará arriba y abajo a una u otra velocidad, o, más exactamente, asumirá una extraña mezcla de muchas velocidades de cambio diferentes, y con ello su valor experimentará una agitación frenética, borrosa y aleatoria.

En la vida cotidiana no somos conscientes directamente de esta agitación, ya sea en partículas o en campos, porque tiene lugar a escalas subatómicas. Pero aquí es donde la inflación tiene un gran impacto. La repentina ráfaga de expansión inflacionaria estiró el espacio en un factor tan enorme que lo que inicialmente habitaba lo microscópico fue llevado a lo macroscópico. Como ejemplo clave, los pioneros[11.1] de la cosmología inflacionaria se dieron cuenta de que diferencias aleatorias entre las agitaciones cuánticas en una localización espacial y otra habrían generado ligeras inhomogeneidades en el dominio microscópico; debido a la agitación cuántica indiscriminada,

la cantidad de energía en una localización habría sido algo diferente de lo que era en otra. Luego, gracias al posterior hinchamiento inflacionario del espacio, estas minúsculas variaciones habrían sido estiradas hasta escalas mucho mayores que el dominio cuántico, dando una pequeña cantidad de granulosidad, de forma muy parecida a como se estiran minúsculas líneas onduladas dibujadas en un globo con un rotulador a lo largo de su superficie cuando usted lo hincha. Éste es, en opinión de los físicos, el origen de la granulosidad que el creyente acérrimo en el modelo del *big bang* estándar despacha simplemente diciendo que «era así», sin dar ninguna justificación. Gracias al enorme estiramiento de las inevitables fluctuaciones cuánticas, la cosmología inflacionaria ofrece una explicación: la expansión inflacionaria estira las minúsculas e inhomogéneas agitaciones cuánticas y las extiende por el cielo.

Durante los miles de millones de años siguientes, estos grumos minúsculos siguieron creciendo gracias al agolpamiento gravitatorio. Igual que en la imagen del *big bang* estándar, los grumos tienen una atracción gravitatoria ligeramente mayor que sus entornos, de modo que atraen material vecino y se hacen aún más grandes. Con el tiempo, los grumos se hacen lo bastante grandes como para dar la materia que constituye las galaxias y las estrellas que las pueblan. Ciertamente, hay *muchos* pasos detallados cuando se pasa de un grumo a una galaxia, y muchos de ellos todavía están por explicar. Pero el marco global es claro: en un mundo cuántico, nada es nunca perfectamente uniforme debido a la agitación inherente al principio de incertidumbre. Y en un mundo cuántico que experimente expansión inflaciona- ría, tal uniformidad puede estirarse desde el micromundo hasta escalas mucho mayores,

proporcionando las semillas para la formación de grandes cuerpos astrofísicos como galaxias.

Ésa es la idea básica, de modo que siéntase libre para saltar al próximo párrafo. Pero para quienes estén interesados, me gustaría hacer la discusión un poco más precisa. Recordemos que la expansión inflacionaria terminaba cuando el valor del campo inflatón se deslizaba hacia abajo por el cuenco de energía potencial y el campo cedía toda su energía retenida y su presión negativa. Describíamos esto como algo que sucedía uniformemente en todo el espacio —el valor inflatón aquí, allí y en todo lugar experimentó la misma evolución— pues eso es lo que sale de forma natural de las ecuaciones que lo gobiernan. Sin embargo, esto es estrictamente cierto sólo si ignoramos los efectos de la mecánica cuántica. En *promedio,* el valor del campo inflatón se deslizó realmente hacia abajo por el cuenco, como esperamos al pensar en un sencillo objeto clásico como una canica que rueda por un plano inclinado. Pero de la misma forma que es probable que la rana que se desliza por el cuenco salte y se agite, la mecánica cuántica nos dice que el campo inflatón experimentó temblores y agitaciones. En su deslizamiento hacia abajo, el valor del campo puede haber saltado o haber sufrido una pequeña agitación en uno u otro lugar. Y debido a esta agitación, el inflatón alcanzó el valor de mínima energía en diferentes lugares en instantes ligeramente diferentes. A su vez, la expansión inflacionaria cesó en instantes ligeramente diferentes en diferentes localizaciones en el espacio, de modo que la cantidad de expansión espacial varió ligeramente de un lugar a otro, dando lugar a inhomogeneidades —arrugas— similares a las que se ven cuando el que prepara la pizza estira la masa un poco más en un lugar que en otro y crea un pequeño bulto. Ahora, la intuición normal dice que las agitaciones que surgen de la

mecánica cuántica serían demasiado pequeñas para ser relevantes a escalas astrofísicas. Pero con inflación, el espacio se expandió a una velocidad tan colosal, duplicándose en tamaño cada 10"'^{7} segundos, que incluso una duración de la inflación ligeramente diferente en lugares vecinos dio como resultado una arruga importante. De hecho, los cálculos llevados a cabo para realizaciones específicas de la inflación han mostrado que las realizaciones generadas de esta manera tienen tendencia a ser demasiado grandes; los investigadores suelen tener que ajustar los detalles en un modelo inflacionario dado (la forma precisa del cuenco de energía potencial del campo inflatón) para asegurar que la agitación cuántica no predice un universo que sea *demasiado* grumoso. Y de ese modo, la cosmología inflacionaria proporciona un mecanismo a medida para entender cómo emergió la uniformidad a pequeña escala responsable de estructuras grumosas como estrellas y galaxias en un universo que en la mayor de las escalas aparece completamente homogéneo.

Según la inflación, los más de 100.000 millones de galaxias, salpicadas por el espacio como diamantes celestes, no son otra cosa que mecánica cuántica escrita en letras grandes en el cielo. Para mí, esta idea es una de las mayores maravillas de la era científica moderna.

La edad de oro de la cosmología

Una prueba espectacular en apoyo de estas ideas procede de minuciosas observaciones de la temperatura de la radiación de fondo de microondas realizadas desde satélites. He resaltado varias veces que la temperatura de la radiación en una parte del cielo coincide con la de otra parte con gran exactitud. Pero lo que aún no he mencionado

es que en la cuarta cifra tras la coma decimal las temperaturas en diferentes lugares *sí* difieren. Medidas de precisión, realizadas por primera vez en 1992 por COBE (el satélite Cosmic Background Explorer) y más recientemente por WMAP (la Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), han determinado que aunque la temperatura podría ser de 2,7249 Kelvin en un punto del espacio, podría ser de 2.7250 Kelvin en otro, y 2.7251 en otro.

Lo maravilloso es que estas variaciones de temperatura extraordinariamente pequeñas siguen una pauta en el cielo que puede ser explicada atribuyéndolas al mismo mecanismo que se ha sugerido para sembrar la formación de galaxias: fluctuaciones cuánticas estiradas por la inflación. La idea es que cuando las minúsculas agitaciones cuánticas se extienden por el espacio, se hacen ligeramente más calientes en una región y ligeramente más frías en otra: los fotones recibidos desde una región ligeramente más densa gastan más energía para superar el campo gravitatorio ligeramente más intenso, y con ello su energía y temperatura son ligeramente más bajas que las de los fotones recibidos de una región menos densa. Los físicos han hecho cálculos precisos basados en esta propuesta, y han generado predicciones de cómo debería variar la temperatura de la radiación de microondas de un lugar a otro en el cielo, como se ilustra en la figura 11.1a. (Los detalles no son esenciales, pero el eje horizontal está relacionado con la separación angular de dos puntos en el cielo y el eje vertical está relacionado con su diferencia de temperaturas.) En la figura 11.1b estas predicciones se comparan con observaciones desde satélites, representadas por diamantes pequeños, y como usted puede ver hay un *acuerdo extraordinario.*

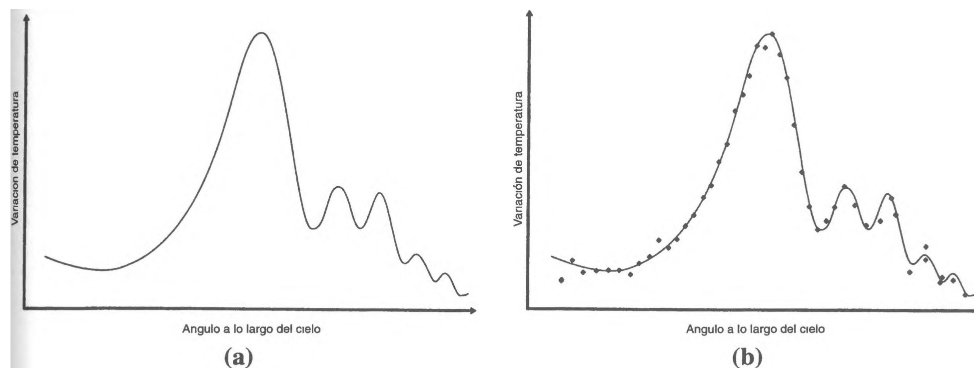


FIGURA 11.1. (a) Predicción de la cosmología inflacionaria para variaciones de temperatura de la radiación de fondo de microondas de un punto a otro en el cielo, (b) Comparación de dichas predicciones con observaciones desde satélites.

Espero que usted esté sorprendido por este acuerdo de teoría y observación, porque, si no es así, eso significa que he fracasado en transmitirle la plena maravilla del resultado. Así que, por si acaso, déjeme resaltar de nuevo lo que está pasando: telescopios a bordo de satélites han medido recientemente la temperatura de los fotones de microondas que han estado viajando hacia nosotros, libremente, durante casi 14.000 millones de años. Han encontrado que fotones que llegan desde diferentes direcciones del espacio tienen temperaturas casi idénticas, que no difieren en más de unas diezmilésimas de grado. Además, las observaciones han mostrado que estas minúsculas diferencias de temperatura forman una figura concreta en el cielo, mostrada por la ordenada progresión de diamantes en la figura 11.1b. Y maravilla de maravillas, los cálculos hechos hoy utilizando el marco inflacionario son capaces de explicar la pauta de estas minúsculas variaciones de temperatura —variaciones asentadas hace casi 14.000 millones de años— y, por si fuera poco, la clave

para esta explicación implica agitaciones que aparecen de la incertidumbre cuántica. ¡No está mal!

Este éxito ha convencido a muchos físicos de la validez de la teoría inflacionaria. Y lo que es de la misma importancia, estas y otras medidas de precisión, que sólo recientemente se han hecho posibles, han permitido que la cosmología madure y pase de ser un campo basado en la especulación y la conjetura a uno más fundado en la observación —una era que ha inspirado a muchos que trabajan en el campo a calificarla como la edad de oro de la cosmología.

Creando un universo

Con semejante avance, los físicos se han sentido motivados para ver hasta dónde puede ir la cosmología inflacionaria. ¿Puede, por ejemplo, resolver el último misterio, recogido en la pregunta de Leibniz de por qué existe siquiera un universo? Bien, al menos con nuestro nivel de comprensión actual, eso es preguntar demasiado. Incluso si una teoría cosmológica fuera a abordar directamente esta cuestión, podríamos preguntar por qué esa teoría concreta —sus hipótesis, ingredientes y ecuaciones— era relevante, llevando así simplemente la cuestión del origen un paso más allá. Si la lógica sola requiriese de algún modo que el universo exista y esté gobernado por un único conjunto de leyes con ingredientes únicos, entonces quizá hubiéramos tenido una historia convincente. Pero, hasta la fecha, esto no es nada más que un sueño.

Una pregunta relacionada pero algo menos ambiciosa, que también ha sido formulada de varias maneras a lo largo de los tiempos es: ¿de dónde procedía toda la masa/energía que constituye el universo? Aquí, aunque la cosmología

inflacionaria no ofrece una respuesta completa, sí ha arrojado una nueva e intrigante luz sobre la cuestión.

Para entender cómo, piense en una caja enorme pero flexible llena de muchos miles de niños bulliciosos, que corren y saltan sin cesar. Imagine que la caja es totalmente impermeable, de modo que no puede escapar el calor ni la energía, pero, puesto que es flexible, sus paredes pueden moverse hacia afuera. Cuando los niños se lanzan implacablemente sobre cada una de las paredes de la caja —centenares a la vez, seguidos inmediatamente de otros centenares— la caja se expande continuamente. Usted podría esperar que, puesto que las paredes son impermeables, la energía encarnada por los bulliciosos niños se quedara por completo dentro de la caja en expansión. Después de todo, ¿dónde más podría ir su energía? Bien, aunque es una proposición razonable, no es completamente correcta. Tiene un lugar para ir. Los niños gastan energía cada vez que se lanzan contra una pared, y gran parte de esta energía se transfiere al movimiento de la pared. La propia expansión de la caja absorbe, y con ello reduce, la energía de los niños.

Incluso si el espacio no tiene paredes, un tipo similar de transferencia de energía tiene lugar cuando el universo se expande. De la misma forma que los niños que se mueven rápidamente trabajan en contra de la fuerza hacia adentro que ejercen las paredes de la caja que se expande, las partículas que se mueven rápidamente en nuestro universo trabajan contra una fuerza hacia adentro cuando el espacio se expande: trabajan en contra de la fuerza hacia adentro de la gravedad. Y de la misma forma que la energía total que encarnan los niños se reduce porque es transferida continuamente a la energía de las paredes de la caja que se expande, la energía total transportada por las partículas ordinarias de materia y la radiación se reduce porque es

continuamente transferida a la gravedad conforme el universo se expande. En resumen, haciendo una analogía entre la fuerza hacia adentro que ejercen las paredes de la caja y la fuerza hacia adentro que ejerce la gravedad (una analogía que se puede formular matemáticamente), concluimos que la gravedad reduce la energía de las partículas de materia que se mueven rápidamente y de la radiación cuando el espacio se hincha. La pérdida de energía de las partículas de movimiento rápido debida a la expansión cósmica ha sido confirmada por observación de la radiación de fondo de microondas.[*28]

Modifiquemos ahora un poco nuestra analogía para hacemos una idea del impacto de un campo inflatón en nuestra descripción del intercambio de energía a medida que el espacio se expande. Imagine que algunos de los niños más traviesos enganchan varias bandas elásticas entre las paredes opuestas que se mueven hacia afuera. Las bandas elásticas ejercen una presión negativa hacia adentro sobre las paredes de la caja que tiene un efecto exactamente opuesto a la presión positiva hacia afuera de los niños; en lugar de transferir energía a la expansión de la caja, la presión negativa de las bandas elásticas «chupa» la energía de la expansión. Cuando la caja se expande, las bandas elásticas se tensan cada vez más, lo que significa que incorporan cantidades crecientes de energía.

Este escenario modificado es relevante para la cosmología porque, como hemos aprendido, al igual que las bandas elásticas de los niños traviesos, un campo inflatón uniforme ejerce una presión negativa dentro de un universo en expansión. Y así, de la misma forma que la energía total encarnada por las bandas elásticas aumenta cuando la caja se expande porque extraen energía de las paredes de la caja, la energía total encarnada por el campo inflatón

aumenta conforme el universo se expande porque *extrae energía de la gravedad.*[*29]

Para resumir: *a medida que el universo se expande, la materia y la radiación ceden energía a la gravedad mientras que un campo inflatón gana energía de la gravedad.*

La naturaleza fundamental de estas observaciones se hace evidente cuando tratamos de explicar el origen de la materia y la radiación que constituyen las galaxias, estrellas y todo lo demás que puebla el cosmos. En la teoría del *big bang* estándar, la masa/energía transportada por la materia y la radiación ha decrecido continuamente a medida que el universo se ha expandido, y por ello la masa/energía en el universo primitivo superaba con mucho a la que vemos hoy. Así pues, en lugar de ofrecer una explicación de dónde se originó toda la masa/energía que actualmente puebla el universo, el *big bang* estándar libra una batalla incesante cuesta arriba: cuanto más atrás mira la teoría, *más* masa/energía debe explicar de alguna forma.

En la cosmología inflacionaria, sin embargo, lo cierto es lo contrario. Recordemos que la teoría inflacionaria defiende que materia y radiación fueron producidas al final de la fase inflacionaria cuando el campo inflatón liberó su energía retenida rodando desde la cima al valle en su cuenco de energía potencial. Por consiguiente, la pregunta relevante es si la teoría puede dar cuenta de un campo inflatón que, precisamente cuando la fase inflacionaria llegaba a un final, tenía la *fabulosa* cantidad de masa/energía necesaria para dar la materia y la radiación en el universo actual.

La respuesta a esta pregunta es que la inflación puede hacerlo, sin ningún esfuerzo. Tal como se acaba de explicar, el campo inflatón es un parásito gravitatorio —se alimenta de la gravedad— y por eso la energía total que llevaba el campo inflatón aumentó a medida que el espacio se expandía. Más exactamente, el análisis matemático muestra

que la densidad de energía en el campo inflatón permaneció constante durante la fase inflacionaria de expansión rápida, lo que implica que la energía total que incorporaba creció en proporción directa al volumen del espacio que llenaba. En el capítulo anterior vimos que el tamaño del universo aumentó en al menos un factor10^{30} durante la inflación, lo que significa que el volumen del universo aumentó en un factor de al menos $(10^{30})^3 = 10^{90}$. Por consiguiente, la energía incorporada en el campo inflatón se incrementó en este mismo factor enorme: cuando la fase inflacionaria llegó a su fin, unos $10\sim^{35}$ segundos después de que empezara, la energía en el campo inflatón creció en un factor del orden de 10^{90}, si no más. *Esto significa que en el inicio de la inflación el campo inflatón no necesitaba tener mucha energía, puesto que la enorme expansión que iba a generar amplificaría enormemente la energía que portaba.* Un sencillo cálculo muestra que una minúscula pepita, del orden de 10^{-26} centímetros de diámetro, llena con un campo inflatón uniforme —y que apenas pesara 10 kilos— adquiriría, gracias a la expansión inflacionaria correspondiente, suficiente energía para dar cuenta de todo lo que vemos en el universo actual.**[11.2]**

Así pues, en abierto contraste con la teoría del *big bang* estándar en la que la masa/energía total del universo primitivo estaba mucho más allá de las palabras, la cosmología inflacionaria, «extrayendo» la gravedad, puede producir toda la materia ordinaria y la radiación en el universo a partir de una minúscula mota de 10 kilogramos de espacio lleno de inflatón. Esto no responde en absoluto a la pregunta de Leib- niz de por qué hay algo en lugar de nada, puesto que aún tenemos que explicar por qué hay un inflatón o incluso el espacio que ocupa. Pero lo que necesita explicación pesa mucho menos que mi perro Rocky, y eso es

ciertamente un punto de partida muy diferente del imaginado en el *big bang* estándar.[*30]

Inflación, suavidad y la flecha del tiempo

Quizá mi entusiasmo ha revelado ya mi preferencia, pero de todos los avances que la ciencia ha logrado en nuestra era, los avances en cosmología me llenan de la máxima admiración y humildad. Parece que nunca haya perdido la excitación que sentí inicialmente hace años cuando leí por primera vez las ideas básicas de la relatividad general y comprendí que desde nuestro minúsculo rincón del espaciotiempo podemos aplicar la teoría de Einstein para aprender acerca de la evolución del cosmos entero. Ahora, algunas décadas más tarde, el progreso tecnológico está sometiendo estas propuestas en otro tiempo abstractas acerca del comportamiento del universo en sus primeros momentos a pruebas observacionales, y las teorías *realmente* funcionan.

Recordemos, no obstante, que además de la relevancia general de la cosmología para la historia del espacio y el tiempo, los capítulos 6 y 7 nos lanzaron a un estudio de la historia primitiva del universo con un objetivo específico: encontrar el origen de la flecha del tiempo. Recuerde de aquellos capítulos que el único marco convincente que encontramos para explicar la flecha del tiempo era que el universo primitivo tenía un orden extraordinariamente alto, es decir, una entropía extraordinariamente baja, que fijó el escenario para un futuro en el que la entropía se hiciera cada vez mayor. De la misma forma que las páginas de *Guerra y paz* no hubieran tenido la capacidad de desordenarse cada vez más si no hubieran estado ordenadas en algún momento, tampoco el universo hubiera

tenido la capacidad de hacerse cada vez más desordenado —leche que se derrama, huevos que se rompen, personas que envejecen— a menos que hubiera estado en una configuración altamente ordenada al principio. El rompecabezas con el que tropezamos consiste en explicar cómo llegó a darse este punto de partida de alto orden y baja entropía.

La cosmología inflacionaria ofrece un avance sustancial, pero déjeme recordarle primero más exactamente el rompecabezas, en caso de que se le hayan pasado algunos de los detalles relevantes.

Hay una fuerte evidencia y pocas dudas de que, pronto en la historia del universo, la materia estaba uniformemente dispersa por el espació. Normalmente, esto sería caracterizado como una configuración de alta entropía —igual que las moléculas de dióxido de carbono de una botella de Coca-Cola se dispersan uniformemente por una habitación— y sería tan tópico que apenas requeriría una explicación. Pero cuando la gravedad cuenta, como lo hace cuando consideramos el universo entero, una distribución de materia es una rara configuración altamente ordenada y de baja entropía, porque la gravedad impulsa a la materia a formar grumos. Análogamente, una curvatura espacial suave y uniforme también tiene muy baja entropía; es altamente ordenada comparada con una curvatura espacial no uniforme y fuertemente bacheada. (De la misma manera que hay muchas formas de que las páginas de *Guerra y paz* estén desordenadas pero sólo una forma de que estén ordenadas, también hay muchas maneras de que el espacio tenga una forma desordenada y no uniforme, pero muy pocas maneras en las que puede estar completamente ordenado, suave y uniforme.) De modo que nos queda el interrogante: ¿por qué el universo primitivo tenía una distribución de materia uniforme (altamente ordenada) de

baja entropía en lugar de una distribución de materia granulada (altamente desordenada) y de alta entropía como puede ser una población de agujeros negros? ¿Y por qué la curvatura del espacio era suave, ordenada y uniforme con extraordinaria aproximación en lugar de estar equipada con una variedad de arrugas enormes y curvas severas, como las generadas por agujeros negros?

Como discutieron en detalle por primera vez Paul Davies y Don Page,[11.3] la cosmología inflacionaria sugiere intuiciones importantes sobre estas cuestiones. Para ver cómo, tenga en mente que una hipótesis esencial del rompecabezas es que una vez que se forma un grumo aquí o allá, su mayor tirón gravitatorio atrae todavía más materia, haciendo que crezca más; en correspondencia, una vez que se forma aquí o allá una arruga en el espacio, su mayor tirón gravitatorio tiende a hacer la arruga aún más pronunciada, lo que lleva a una curvatura espacial bacheada y altamente no uniforme. Cuando la gravedad cuenta, las configuraciones ordinarias, poco notables y de alta entropía son grumosas y bacheadas.

Pero advierta lo siguiente: este razonamiento se basa completamente en la naturaleza *atractiva* de la gravedad ordinaria. Grumos y baches crecen porque *tiran* con fuerza del material vecino, convenciendo a dicho material para unirse al grumo. Durante la breve fase inflacionaria, sin embargo, la gravedad era *repulsiva* y eso lo cambió todo. Considere la forma del espacio. El enorme empuje hacia afuera de la gravedad repulsiva hizo que el espacio se hinchara tan rápidamente que los baches y alabeos iniciales fueron estirados, de forma muy parecida a como hinchar totalmente un globo arrugado estira su superficie.[*31] Más aún, puesto que el volumen del espacio aumentó en un factor colosal durante el breve período inflacionario, la densidad de cualquier agrupación de materia quedó

completamente diluida, de la misma forma que la densidad de peces en su acuario quedaría diluida si el volumen del tanque aumentase repentinamente hasta el de una piscina olímpica. Así, aunque la gravedad atractiva hace que crezcan agregados de materia y arrugas del espacio, la gravedad repulsiva hace lo contrario: hace que disminuyan, lo que lleva a un resultado cada vez más suave y más uniforme.

Así pues, al final de la ráfaga inflacionaria el tamaño del universo había crecido fantásticamente, cualquier no uniformidad en la curvatura del espacio se había estirado y cualquier agrupamiento inicial se había diluido hasta hacerse irrelevante. Además, cuando el campo inflatón se deslizó hasta el fondo de su cuenco de energía potencial, poniendo fin a la ráfaga de expansión inflacionaria, su energía retenida se convirtió en un baño casi uniforme de partículas de materia ordinaria en todo el espacio (uniforme hasta llegar a las minúsculas pero críticas inhomogeneidades procedentes de la agitación cuántica). En total, todo esto parece un gran avance. El resultado al que hemos llegado vía inflación —*una expansión del espacio suave y uniforme poblada por una distribución de materia casi uniforme*— era exactamente el que estábamos tratando de explicar. Es exactamente la configuración de baja entropía que necesitamos para explicar la flecha del tiempo.

Entropía e inflación

Realmente es un avance significativo. Pero quedan dos cuestiones importantes.

En primer lugar, parece que llegamos a la conclusión de que la ráfaga inflacionaria suaviza las cosas y con ello reduce la entropía total, incorporando un mecanismo físico

—no sólo un golpe de azar estadístico— que parece violar la segunda ley de la termodinámica. Si ese fuera el caso, o nuestra comprensión de la segunda ley o nuestro razonamiento actual tendrían que ser erróneos. Pero, en realidad, no tenemos que enfrentamos a ninguna de estas opciones, porque la entropía total no decrece como resultado de la inflación. Lo que sucede realmente durante la ráfaga inflacionaria es que la entropía total aumenta, pero aumenta *mucho menos de lo que podría haber hecho.* Al final de la fase inflacionaria el espacio estaba alisado, y por eso la contribución gravitatoria a la entropía —la entropía asociada con la posible forma bacheada, no ordenada y no uniforme— era mínima. Sin embargo, cuando el campo inflatón se deslizó por su cuenco y cedió su energía retenida, se estima que produjo aproximadamente $1O^{80}$ partículas de materia y radiación. Este enorme número de partículas, como un libro con un número enorme de páginas, encierra una enorme cantidad de entropía. Así pues, incluso si la entropía gravitatoria se redujo, el aumento de entropía por la producción de todas estas partículas compensó de sobra dicha reducción. La entropía total aumentó, precisamente como esperamos de la segunda ley.

Pero, y éste es el punto importante, la ráfaga inflacionaria, al suavizar el espacio y asegurar un campo gravitatorio homogéneo, uniforme y de alta entropía, creó un *hueco* enorme entre lo que era la contribución de la gravedad a la entropía y lo que podría haber sido. La entropía total aumentó durante la inflación, pero lo hizo en una cantidad ridicula comparada con lo que podía haber aumentado. En este sentido es en el que la inflación generó un universo de baja entropía: al final de la inflación, la entropía había aumentado, aunque en un factor que quedaba muy lejos del factor en el que había aumentado la

extensión espacial. Si la entropía se asemejara a los impuestos de sociedades, sería como si la ciudad de Nueva York adquiriera el desierto del Sahara. Los impuestos totales recaudados aumentarían, pero en una cantidad minúscula comparada con el aumento total de terreno.

Desde el final de la inflación, la gravedad ha estado tratando de maquillar la diferencia de entropía. Cada agrupamiento —sea una galaxia, o una estrella en una galaxia, o un planeta, o un agujero negro— que la gravedad ha sacado posteriormente de la uniformidad (sembrado por la minúscula no uniformidad de las agitaciones cuánticas) ha aumentado la entropía y ha llevado a la gravedad un paso más cerca de hacer real su entropía potencial. En este sentido, entonces, la inflación es un mecanismo que produjo un gran universo con entropía gravitatoria relativamente baja, y de este modo fijó el escenario para los siguientes miles de millones de años de agrupamiento gravitatorio de cuyos efectos somos ahora testigos. Y por eso, la cosmología inflacionaria da una dirección a la flecha del tiempo al generar un pasado con entropía gravitatoria extraordinariamente baja; el futuro es la dirección en la que crece esta entropía.[11.4]

La segunda cuestión se hace evidente cuando seguimos descendiendo por el camino en el que la flecha del tiempo nos llevaba en el capítulo 6. Desde un huevo a la gallina que lo puso, al alimento de la gallina, al reino vegetal, al calor y la luz del Sol, al gas primordial uniformemente distribuido del *big bang,* seguíamos la evolución del universo hacia un pasado que tenía cada vez un orden mayor, haciendo retroceder en cada etapa el rompecabezas de la larga entropía un paso más en el tiempo. Ahora acabamos de comprender que una etapa incluso anterior de expansión inflacionaria puede explicar de forma natural las secuelas suaves y uniformes del *bang.* Pero ¿qué pasa con la propia

inflación? ¿Podemos explicar el eslabón inicial en esta cadena que hemos seguido? ¿Podemos explicar por qué las condiciones eran las correctas para que sucediera siquiera una ráfaga inflacionaria?

Ésta es una cuestión de importancia trascendental. Por muchos rompecabezas que la cosmología inflacionaria resuelva en teoría, si nunca tuvo lugar una era de expansión inflacionaria la aproximación sería irrelevante. Además, puesto que no podemos volver al universo primitivo y determinar directamente si la inflación ocurrió o no, valorar si hemos hecho progresos reales en fijar una dirección para la flecha del tiempo requiere que determinemos la *probabilidad* de que se consiguiera la condición necesaria para una ráfaga inflacionaria. Los físicos se erizan ante la dependencia del *big bang* estándar de condiciones iniciales homogéneas muy bien ajustadas que, aunque motivadas observacio- nalmente, están inexplicadas teóricamente. Es profundamente insatisfactorio que el estado de baja entropía del universo primitivo sea simplemente supuesto; parece vano que la flecha del tiempo sea impuesta al universo sin explicación. A primera vista, la inflación ofrece progresos al demostrar que lo que se da por supuesto en el *big bang* estándar surge a partir de la evolución inflacionaria. Pero si el inicio de la inflación requiere aún otras condiciones altamente especiales con entropía extraordinariamente baja, nos encontramos de nuevo en el punto de salida. Simplemente hemos cambiado las condiciones especiales del *big bang* por aquellas necesarias para desencadenar la inflación, y el rompecabezas de la flecha del tiempo permanecerá igual de enigmático.

¿Cuáles son las condiciones necesarias para la inflación? Hemos visto que la inflación es el resultado inevitable de que el valor del campo inflatón quede atascado, durante sólo un momento y sólo dentro de una minúscula región, en

la meseta de alta energía en su cuenco de energía potencial. Por consiguiente, lo que tenemos que hacer es determinar cuán probable es realmente esta configuración de partida para la inflación. Si iniciar la inflación se prueba fácil, estaremos en buen camino. Pero si la probabilidad de alcanzar las condiciones necesarias es extraordinariamente pequeña, simplemente habremos desplazado la cuestión de la flecha del tiempo un paso más atrás: encontrar la explicación para la configuración del campo inflatón de baja entropía que echó la bola a rodar.

Describiré en primer lugar el pensamiento actual sobre esta cuestión a la luz más optimista, y luego volveré a los elementos esenciales de la historia que permanecen nublados.

Boltzmann Redux

Como se mencionó en el capítulo anterior, la ráfaga inflacionaria se considera mejor como un suceso que ocurre en un universo preexistente, más que considerarse como la creación del propio universo. Aunque no tenemos una comprensión incuestionable de cómo era el universo durante dicha era preinflacionaria, veamos hasta dónde podemos llegar si suponemos que las cosas estaban en un estado totalmente normal de alta entropía. En concreto, imaginemos que el espacio preinflacionario primordial estaba lleno de alabeos y baches, y que el campo inflatón era también altamente desordenado, que su valor saltaba de un lado a otro como la rana en el cuenco de metal caliente.

Ahora, de la misma forma que usted espera que si juega pacientemente en una máquina tragaperras, más pronto o más tarde los cilindros que giran aleatoriamente acabarán

por dar diamantes triples, esperamos que más pronto o más tarde una fluctuación aleatoria dentro de esta arena turbulenta y altamente energética del universo primordial hará que el valor del campo inflatón salte al valor correcto y uniforme en alguna pequeña pepita de espacio, lo que desencadena una ráfaga de expansión inflacionaria. Como se explicó en la sección anterior, los cálculos muestran que la pepita de espacio sólo tiene que haber sido minúscula —del orden de 10“^{26} centímetros de diámetro— para que la expansión cosmológica consiguiente (expansión inflacionaria seguida por expansión *big bang* estándar) lo haya estirado hasta hacerla mayor que el universo que vemos hoy. Así, en lugar de suponer o simplemente declarar que las condiciones en el universo primitivo eran las correctas para que tuviera lugar la expansión inflacionaria, en esta forma de considerar las cosas una fluctuación ultramicroscópica con un peso de apenas 10 kilogramos, que ocurre dentro de un ambiente de desorden ordinario y poco notable, dio lugar a las condiciones necesarias.

Más aún, de la misma forma que la máquina tragaperras generará también una gran variedad de resultados no ganadores, en otras regiones del espacio primordial habrían sucedido también otros tipos de fluctuaciones del campo inflatón. En la mayoría de ellas la fluctuación no habría tenido el valor correcto o no habría sido suficientemente uniforme para que ocurriera expansión inflacionaria. (Incluso en una región que es de apenas 10^{2í}’ centímetros de diámetro, el valor del campo puede variar incontroladamente.) Pero todo lo que nos importa es que había una pepita que generó la ráfaga inflacionaria que suaviza el espacio y proporcionó el primer eslabón en la cadena de baja entropía, lo que llevó en última instancia a nuestro cosmos familiar. Puesto que sólo vemos nuestro

único y gran universo, sólo necesitamos que la máquina tragaperras cósmica dé el premio una vez.[11.5]

Puesto que estamos rastreando el universo hasta una fluctuación estadística a partir del caos primordial, esta explicación para la flecha del tiempo comparte ciertas características con la propuesta original de Boltzmann. Recordemos del capítulo 6 que Boltzmann sugirió que todo lo que vemos ahora surgió como una rara pero alguna vez espera- ble fluctuación a partir del desorden total. El problema con la formulación original de Boltzmann, sin embargo, era que no podía explicar por qué la fluctuación aleatoria había ido tan lejos y producido un universo enormemente más ordenado que lo que se necesitaría para soportar la vida tal como la conocemos. ¿Por qué es el universo tan enorme, con miles de millones de galaxias, cada una con miles de millones de estrellas, cuando podría haber hecho drásticos recortes quedándose, digamos, con tan sólo unas pocas galaxias, o incluso sólo una?

Desde el punto de vista estadístico, una fluctuación más modesta que produjera algún orden pero no tanto como el que vemos actualmente sería mucho más probable. Además, puesto que la entropía media está aumentando, el razonamiento de Boltzmann sugiere que sería mucho más probable que todo lo que vemos hoy hubiese aparecido *precisamente ahora* como un raro salto estadístico a entropía más baja. Recordemos la razón: cuanto más atrás sucediera la inflación, más baja tendría que haber sido la entropía (la entropía empieza a aumentar después de cualquier descenso a baja entropía, como en la figura 6.4, de modo que si la fluctuación sucedió ayer, debió haber descendido hasta la entropía más baja de ayer, y si sucedió hace 1.000 millones de años, debió haber descendido hasta la entropía aún más baja de dicha era). Por lo tanto, cuanto más retrocedemos en el tiempo, más drástica e improbable

es la fluctuación requerida. Así pues, es mucho más probable que el salto acabe de suceder. Pero si aceptamos esta conclusión, no podemos confiar en los recuerdos, los registros o incluso las leyes de la física que subyacen a la propia discusión —una posición completamente insostenible.

La tremenda ventaja de la encarnación inflacionaria de la idea de Boltzmann es que una *pequeña* fluctuación al principio —un salto *modesto* a las condiciones favorables, dentro de una *minúscula* pepita de espacio— da inevitablemente el universo enorme y ordenado que conocemos. Una vez que se puso en marcha la expansión inflacionaria, la pequeña pepita fue estirada *inexorablemente* hasta escalas al menos tan grandes como el universo que vemos actualmente, y por ello no hay ningún misterio en por qué el universo no redujo esquinas; no hay ningún misterio en por qué el universo es inmenso y está poblado por un enorme número de galaxias. Desde la salida, la inflación dio al universo un trato sorprendente. Un salto a entropía más baja dentro de una minúscula pepita de espacio fue compensado por expansión inflacionaria en los inmensos confines del cosmos. Y, de máxima importancia, el estiramiento inflacionario no dio simplemente un universo grande y viejo. Dio *nuestro* gran universo —la inflación explica la forma del espacio, explica la uniformidad a gran escala y explica incluso las inhomogeneidades a escala «más pequeña» tales como galaxias y variaciones de temperatura en la radiación de fondo—. La inflación reúne una riqueza de poder explicatorio y predictivo en una única fluctuación a baja entropía.

Y así es muy posible que Boltzmann haya estado en lo cierto. Todo lo que vemos puede haber sido resultado de una fluctuación aleatoria a partir de un estado altamente

desordenado de caos primordial. En esta realización de sus ideas, no obstante, podemos confiar en nuestros registros y podemos confiar en nuestros recuerdos: la fluctuación no sucedió precisamente ahora. El pasado sucedió realmente. Nuestros registros son registros de cosas que tuvieron lugar. La expansión inflacionaria amplifica una mota de orden minúscula en el universo primitivo —«desenrolla» el universo en una extensión enorme con mínima entropía gravitatoria— de modo que los 14.000 millones de años de evolución posterior, de posterior agrupación en galaxias, estrellas y planetas no presenta ningún enigma.

De hecho, esta aproximación nos dice incluso un poco más. De la misma forma que es posible dar con el premio gordo en varias máquinas tragaperras en un casino, en el estado primordial de alta entropía y caos general no había ninguna razón para que las condiciones necesarias para la expansión inflacionaria aparecieran solamente en una única pepita espacial. En su lugar, como ha propuesto Andrei Linde, podría haber habido muchas pepitas diseminadas aquí y allí que sufrieron expansión inflacionaria que suavizara el espacio. Si así fuera, nuestro universo sería simplemente uno entre muchos que brotaron —y quizá siguen brotando— cuando fluctuaciones aleatorias dieron las condiciones correctas para una ráfaga inflacionaria, como se ilustra en la figura 11.2. Puesto que estos otros universos estarían probablemente separados para siempre del nuestro, es difícil imaginar cómo podríamos establecer alguna vez si esta imagen «multiverso» es verdadera. Sin embargo, como marco conceptual, es a la vez rica y tentadora. Entre otras cosas, sugiere un cambio posible en nuestro pensamiento cosmológico: en el capítulo 10 describí la inflación como un «frente» en la teoría del *big bang* estándar, en la que el *bang* se identifica con una ráfaga fugaz de rápida expansión. Pero si consideramos el brote

inflacionario de cada nuevo universo en la figura 11.2 como su propio *bang,* se ve mejor la propia inflación como el marco cosmológico primordial dentro del que suceden evoluciones tipo *big bang,* burbuja a burbuja. Así pues, en lugar de estar incorporada la inflación en la teoría del *big bang* estándar, en esta aproximación es el *big bang* estándar el que está incorporado en la inflación.

La inflación y el huevo

Así que ¿por qué vemos un huevo que se aplasta pero no se desaplasta? ¿De dónde procede la flecha del tiempo que todos experimentamos? Hasta aquí es adonde nos ha llevado esta aproximación. Gracias a una fluctuación rara pero no imposible a partir de un estado primordial poco notable y con alta entropía, una minúscula pepita de espacio de 10 kilogramos logró las condiciones que llevaron a una breve ráfaga de expansión inflacionaria. El tremendo hincha- miento produjo un espacio estirado enormemente grande y extraordinariamente suave, y, cuando la ráfaga terminó, el campo inflatón liberó su energía enormemente amplificada llenando el espacio casi uniformemente de materia y radiación. Cuando se redujo la gravedad repulsiva del inflatón, la gravedad atractiva ordinaria se hizo dominante. Y, como hemos visto, la gravedad atractiva explota minúsculas inhomogeneidades provocadas por agitaciones cuánticas para hacer que la materia se aglutine, formando galaxias y estrellas y llevando en última instancia a la formación del Sol, la Tierra, el resto del sistema solar, y las otras características de nuestro universo observado. (Como se discutió, unos 7.000 millones de años después del *bang* la gravedad repulsiva se hizo una vez más dominante, pero esto es sólo relevante en la mayor de las escalas

cósmicas y no tiene impacto directo sobre entidades más pequeñas como las galaxias individuales o nuestro sistema solar, donde sigue reinando la gravedad atractiva ordinaria.) La energía de relativa baja entropía del Sol fue utilizada por las formas de vida animal y vegetal de baja entropía en la Tierra para producir aún más formas de vida de baja entropía, elevando lentamente la entropía total mediante calor y residuos. Finalmente, esta cadena produjo una gallina que produjo un huevo —y usted ya conoce el resto de la historia: el huevo rodó por la encimera de su cocina y se aplastó contra el suelo como parte del impulso incesante del universo hacia mayor entropía—. Es la naturaleza uniformemente suave, altamente ordenada y de baja entropía del tejido del espacio producido por el estiramiento inflacionario que es el análogo a tener las páginas de *Guerra y paz* en su disposición numérica adecuada; es este estado de orden primitivo —la ausencia de baches o alabeos severos o agujeros negros gigantescos— el que preparó al universo para la evolución posterior hacia entropía más alta y con ello proporcionó la flecha del tiempo que todos experimentamos. Con nuestro nivel de comprensión actual, ésta es la explicación más completa que se ha dado para la flecha del tiempo.

¿La mosca en la miel?

Para mí, esta historia de la cosmología inflacionaria y la flecha del tiempo es muy bonita. A partir de un reino energético y salvaje de caos primordial, surgió una fluctuación ultramicroscópica de campo inflatón uniforme con un peso mucho menor que el límite de equipaje autorizado en un avión. Esto inició la expansión inflacionaria

que dio una dirección a la flecha del tiempo, y el resto es historia.

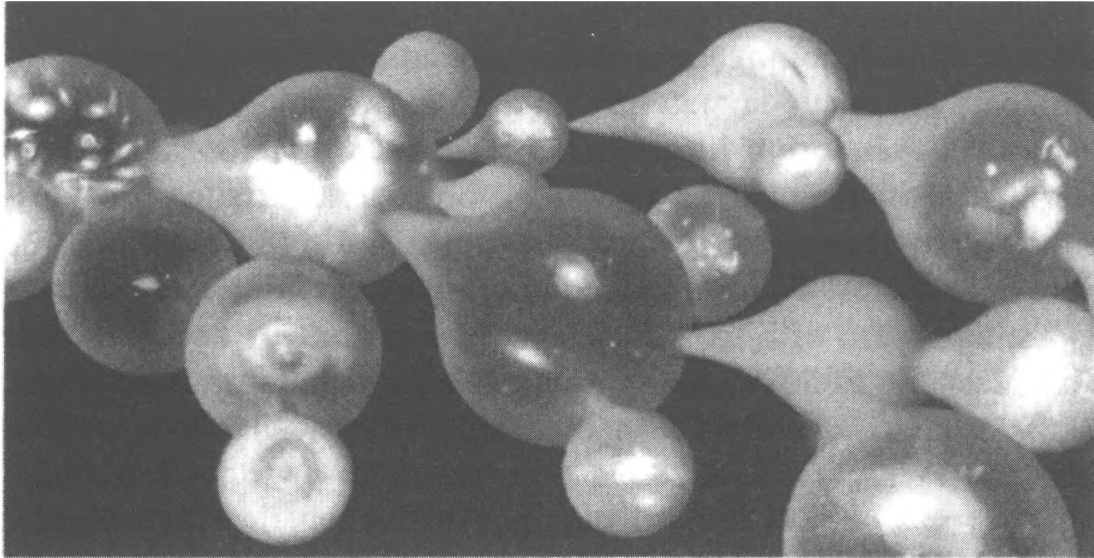


FIGURA 11.2. La inflación puede ocurrir repetidamente, brotando nuevos universos de los más viejos.

Pero al contar esta historia hemos hecho una hipótesis central que todavía no está justificada. Para evaluar la probabilidad de que se inicie la inflación, hemos tenido que especificar las características del reino preinflacionario a partir del cual se supone que ha emergido la expansión inflacionaria. El reino particular que hemos imaginado —salvaje, caótico, energético— suena razonable, pero delinear esta descripción intuitiva con precisión matemática se muestra desafiante. Además, es sólo una conjetura. La conclusión es que no sabemos cómo eran las condiciones en el reino preinflacionario supuesto, la región borrosa de la figura 10.3, y sin esa información somos incapaces de hacer una evaluación convincente de la probabilidad de iniciar la inflación; cualquier cálculo de la probabilidad depende sensiblemente de las hipótesis que hagamos.[11.6]

Con esta laguna en nuestro conocimiento, el resumen más razonable es que la inflación ofrece un marco explicatorio poderoso que agrupa problemas aparentemente dispares —el problema del horizonte, el problema de la planitud, el problema del origen de estructura, el problema de la baja entropía del universo primitivo— y ofrece una única solución que aborda todos ellos. Esto está muy bien. Pero para dar el paso siguiente necesitamos una teoría que pueda tratar las condiciones extremas características de la región borrosa —calor extremo y densidad colosal— de modo que tengamos una probabilidad de sacar una idea precisa e inequívoca de los primeros momentos del cosmos.

Como aprenderemos en el próximo capítulo, esto requiere una teoría que pueda superar quizá el máximo obstáculo al que se ha enfrentado la física teórica durante los últimos ochenta años: un abismo fundamental entre la relatividad general y la mecánica cuántica. Muchos investigadores creen que una aproximación relativamente nueva llamada *teoría de supercuerdas* puede haberlo conseguido, pero si la teoría de supercuerdas es correcta, el tejido del cosmos es mucho más extraño que lo que cualquiera imaginó.

12

El mundo en una cuerda

El tejido según la teoría de cuerdas

Imagine un universo en el que para entender algo usted tendría que entenderlo todo. Un universo en el que para decir algo acerca de por qué un planeta describe órbitas en torno a una estrella, de por qué una pelota de béisbol sigue una trayectoria particular, de cómo funciona un imán o una batería, de cómo actúan la luz y la gravedad —un universo en el que para decir algo acerca de algo— usted necesitaría desvelar las leyes más fundamentales y determinar cómo actúan sobre los constituyentes más finos de la materia. Afortunadamente, este universo no es nuestro universo.

Si lo fuera, es difícil ver cómo hubiera podido avanzar la ciencia. Durante siglos, la razón por la que hemos sido capaces de avanzar es que hemos sido capaces de trabajar por partes; hemos sido capaces de desvelar misterios paso a paso, y cada nuevo descubrimiento iba un poco más lejos que el anterior. Newton no necesitó saber sobre los átomos para hacer grandes avances en la comprensión del movimiento y la gravedad. Maxwell no necesitó saber sobre electrones y otras partículas cargadas para desarrollar una poderosa teoría del electromagnetismo. Einstein no necesitó abordar la encarnación primordial del espacio y el tiempo para formular una teoría de cómo se curvan al servicio de la fuerza gravitatoria. Más bien, cada uno de estos

descubrimientos, así como los muchos otros que subyacen a nuestra concepción actual del cosmos, tuvo lugar dentro de un contexto limitado que inevitablemente dejaba muchas cuestiones básicas sin respuesta.

Cada descubrimiento pudo aportar su propia pieza al rompecabezas, incluso si nadie sabía —y seguimos sin saber — qué gran imagen de síntesis comprende todas las piezas del rompecabezas.

Una observación íntimamente relacionada es que aunque la ciencia de hoy difiere drásticamente de la de hace incluso cincuenta años, sería simplista resumir el progreso científico como una sucesión de nuevas teorías que destronan a sus predecesoras. Una descripción más correcta es que cada nueva teoría refina a su predecesora proporcionando un marco más exacto y de más amplio alcance. La teoría de la gravedad de Newton ha sido reemplazada por la relatividad general de Einstein, pero sería ingenuo decir que la teoría de Newton era falsa. En el dominio de los objetos que no se mueven en ningún lugar a una velocidad próxima a la de la luz y no producen campos gravi- tatorios tan intensos como los de agujeros negros, la teoría de Newton es fantásticamente precisa. Pero esto no quiere decir que la teoría de Einstein sea una variante menor de la de Newton; al mejorar la aproximación a la gravedad de Newton, Einstein introdujo todo un nuevo esquema conceptual, un esquema que alteraba radicalmente nuestra comprensión del espacio y el tiempo. Pero la potencia del descubrimiento de Newton dentro del dominio que él pretendía (movimiento planetario, movimiento terrestre común y demás) es incuestionable.

Imaginamos que cada nueva teoría nos lleva más cerca del escurridizo objetivo de la verdad, pero la pregunta de si hay o no una teoría final —una teoría que no pueda ser refinada más, porque ha revelado finalmente el

funcionamiento del universo en el nivel más profundo posible— es una pregunta que nadie puede responder. Incluso así, la pauta seguida durante los trescientos últimos años de descubrimientos nos ofrece unos indicios tentadores de que puede desarrollarse una teoría semejante. Hablando en general, cada nuevo avance importante ha reunido un abanico más amplio de fenómenos físicos bajo menos paraguas teóricos. Los descubrimientos de Newton mostraron que las fuerzas que gobiernan el movimiento planetario son las mismas que las que gobiernan la caída de objetos aquí en la Tierra. Los descubrimientos de Maxwell demostraron que electricidad y magnetismo son dos caras de la misma moneda. Los descubrimientos de Einstein demostraron que espacio y tiempo son tan inseparables como el toque de Midas y el oro. Los descubrimientos de una generación de físicos a principios del siglo XX establecieron que miríadas de misterios de la microfísica podían explicarse con precisión utilizando la mecánica cuántica. Más recientemente, los descubrimiento de Glashow, Salam y Weinberg demostraron que el electromagnetismo y la fuerza nuclear débil son dos manifestaciones de una única fuerza —la fuerza electro-débil— y existe incluso evidencia circunstancial y provisional de que la fuerza nuclear fuerte puede unirse a la fuerza electrodébil en una síntesis aún mayor.[12.1] Juntando todo esto, vemos una pauta que va de la complejidad a la simplicidad, una pauta que va de la diversidad a la unidad. Las flechas explicatorias parecen estar convergiendo en un marco poderoso todavía por descubrir que unificaría todas las fuerzas de la Naturaleza y toda la materia dentro de una única teoría capaz de describir todos los fenómenos físicos.

El crédito por iniciar la búsqueda moderna de una teoría unificada se atribuye correctamente a Albert Einstein, quien durante más de tres décadas trató de combinar

electromagnetismo y relatividad general en una única teoría. Durante largos períodos en esas décadas, él fue el único buscador de esa teoría unificada, y su búsqueda apasionada pero solitaria le alienó de la corriente principal de la comunidad de la física. Durante los últimos 20 años, sin embargo, ha habido un resurgimiento en la búsqueda de una teoría unificada; el sueño solitario de Einstein se ha convertido en la fuerza impulsora para toda una generación de físicos. Pero con los descubrimientos realizados desde la época de Einstein se ha producido un desplazamiento en el centro de atención. Incluso si aún no tenemos una teoría satisfactoria que combine la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electrodébil, estas tres fuerzas (electromagnética, débil, fuerte) han sido descritas por un único lenguaje uniforme basado en la mecánica cuántica. Pero la relatividad general, nuestra teoría más refinada de la cuarta fuerza, queda fuera del marco. La relatividad general es una teoría clásica: no incorpora ninguno de los conceptos probabilistas de la teoría cuántica. Un objetivo primordial del programa de unificación moderno es, por consiguiente, combinar relatividad general y mecánica cuántica, y describir las cuatro fuerzas dentro del mismo marco mecanocuántico. Esto ha resultado ser uno de los problemas más difíciles a los que se ha enfrentado nunca la física teórica.

Veamos por qué.

Agitación cuántica y espacio vacío

Si yo tuviera que seleccionar la característica única y más reveladora de la mecánica cuántica, habría escogido el principio de incertidumbre. Probabilidades y funciones de onda proporcionan ciertamente un marco radicalmente

nuevo, pero es el principio de incertidumbre el que resume la ruptura con la física clásica. Recordemos que en los siglos xvii y xvin los científicos creían que una descripción completa de la realidad física equivalía a especificar las posiciones y velocidades de cada constituyente de la materia que formaba el cosmos. Y con la llegada del concepto de campo en el siglo xix, y su posterior aplicación a las fuerzas electromagnética y gravitatoria, esta visión se amplió para incluir el valor de cada campo —es decir, la intensidad de cada campo— y la velocidad de cambio del valor de campo, en cada lugar en el espacio. Pero en la década de 1930, el principio de incertidumbre desmanteló esta idea de la realidad al demostrar que no se puede conocer a la vez la posición y la velocidad de una partícula; no se puede conocer a la vez el valor de un campo en un lugar en el espacio y con qué rapidez está cambiando el valor del campo. La incertidumbre cuántica lo prohíbe.

Como discutimos en el último capítulo, esta incertidumbre cuántica asegura que el micromundo es un reino agitado y turbulento. Antes, nos centramos en las agitaciones cuánticas inducidas por la incertidumbre para el campo inflatón, pero la incertidumbre cuántica se aplica a todos los campos. El campo electromagnético, los campos de las fuerzas nucleares fuerte y débil, el campo gravitatorio, todos están sometidos a frenéticas agitaciones cuánticas en escalas microscópicas. De hecho, estas agitaciones del campo existen incluso en el espacio que usted hubiera considerado vacío normalmente, espacio que no parecería contener materia ni campos. Ésta es una idea de importancia crítica, pero si usted no la ha encontrado con anterioridad es natural que esté intrigado. Si una región del espacio no contiene nada —si es un vacío— ¿no significa eso que no hay nada que se pueda agitar? Bien, ya aprendimos que el concepto de nada es sutil. Piense

simplemente en el océano de Higgs que según la teoría moderna permea el espacio vacío. Las agitaciones cuánticas a las que me refiero ahora sirven solamente para hacer la noción de «nada» todavía más sutil. He aquí lo que quiero decir.

En la física precuántica (y preHiggs), hubiéramos declarado que una región del espacio está completamente vacía si no contenía partículas y el valor de cualquier campo era uniformemente cero.[*32] Consideremos ahora esta noción clásica de vacío a la luz del principio de incertidumbre cuántico. Si un campo llegara a tener y mantener un valor nulo, conoceríamos su valor —cero— y también la velocidad de cambio de su valor —también cero—. Pero según el principio de incertidumbre, es imposible que ambas propiedades estén definidas a la vez. En su lugar, si un campo tiene un valor definido en un instante, cero en nuestro caso, el principio de incertidumbre nos dice que su velocidad de cambio es completamente aleatoria. Y una velocidad de cambio aleatoria significa que en instantes posteriores el valor del campo fluctuará aleatoriamente arriba y abajo, incluso en lo que normalmente consideramos como espacio completamente vacío. De modo que la noción intuitiva de vacío, una noción en la que todos los campos tienen y mantienen el valor cero, es incompatible con la mecánica cuántica. El valor de un campo puede fluctuar alrededor del valor cero pero no puede ser uniformemente cero en una región durante más de un breve instante.[12.3] En lenguaje técnico los físicos dicen que los campos sufren *fluctuaciones del vacío.*

La naturaleza aleatoria de las fluctuaciones de campo del vacío asegura que en todas las regiones salvo las más microscópicas hay tantas variaciones «arriba» como «abajo» y por ello su promedio es cero, de la misma forma que la superficie de una canica parece perfectamente lisa a

simple vista incluso si un microscópico electrónico revela que está rayada a escalas minúsculas. No obstante, incluso si no podemos verlas directamente, hace más de medio siglo que la realidad de las agitaciones del campo cuántico, incluso en el espacio vacío, fue establecida de forma concluyente gracias a un descubrimiento sencillo pero profundo.

En 1948, el físico holandés Hendrik Casimir calculó cómo podrían detectarse experimentalmente las fluctuaciones de vacío del campo electromagnético. La teoría cuántica dice que las agitaciones del campo electromagnético en el espacio vacío adoptarán diversas formas, como se ilustra en la figura 12. la. La idea de Casimir consistió en advertir que colocando dos placas metálicas ordinarias en una región por lo demás vacía, como en la figura 12.1b, se podría inducir una sutil modificación en estas agitaciones de campo de vacío. Es decir, las ecuaciones cuánticas muestran que en la región comprendida entre las placas habrá menos fluctuaciones (sólo están permitidas aquellas fluctuaciones del campo electromagnético cuyos valores se anulan en la posición de cada placa). Casimir analizó las consecuencias de esta reducción en las agitaciones del campo y encontró algo extraordinario. De la misma forma que una reducción en la cantidad de aire en una región crea un desequilibrio de presión (por ejemplo, a gran altitud usted puede sentir que el aire más enrarecido ejerce menos presión sobre el exterior de sus tímpanos), la reducción en las agitaciones del cam-

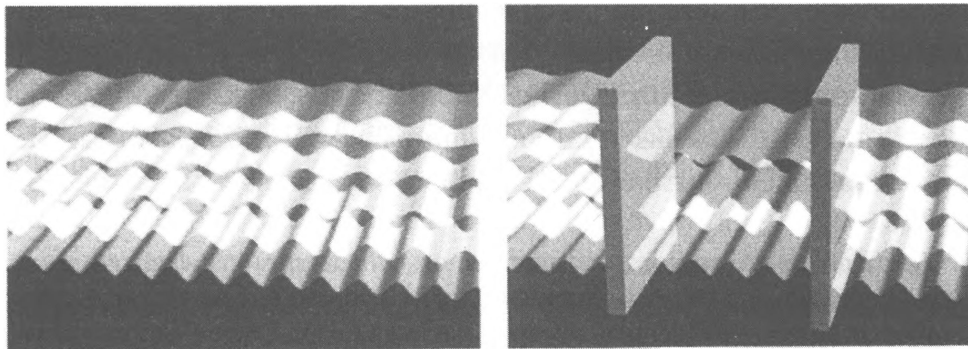


FIGURA 12.1. **(a)** Fluctuaciones de vacío del campo electromagnético, **(b)** Fluctuaciones de vacío entre dos placas metálicas y las exteriores a las placas.

po cuántico entre las placas también produce un desequilibrio de presión: las agitaciones de campo cuántico entre las placas se hacen un poco más débiles que las de fuera de las placas, y este desequilibrio *impulsa a las placas una hacia otra.*

Piense en lo extraño que es esto. Usted coloca dos placas metálicas ordinarias, lisas y descargadas, en una región vacía del espacio, una frente a otra. Puesto que sus masas son minúsculas, la atracción gravitatoria entre ellas es tan pequeña que puede ser completamente ignorada. Puesto que no hay nada más alrededor, usted concluye naturalmente que las placas no se moverán. Pero no es esto lo que los cálculos de Casimir predecían que sucedería. Él concluyó que las placas serían guiadas suavemente por el brazo fantasmal de las fluctuaciones de vacío cuántico para moverse una hacia otra.

Cuando Casimir anunció por primera vez estos resultados teóricos no existían aparatos suficientemente sensibles para poner a prueba sus predicciones. Pero antes de una década, otro físico holandés, Marcus Spaamay, pudo iniciar el primer

test rudimentario de *esta fuerza de Casimir,* y desde entonces se han realizado experimentos cada vez más precisos. En 1997, por ejemplo, Steve Lamoreaux, entonces en la Universidad de Washington, confirmó las predicciones de Casimir con una precisión del 5 por 100.4[12.4] (Para placas del tamaño aproximado de una carta de baraja y separadas una diezmilésima de centímetro, la fuerza entre ellas es aproximadamente igual al peso de una simple lágrima; esto muestra el reto que supone medir la fuerza de Casimir.) Ahora hay pocas dudas de que la noción intuitiva de espacio vacío como un escenario estático, tranquilo, uniforme carece de base. Debido a la incertidumbre cuántica, el espacio vacío rebosa de actividad cuántica.

Los científicos necesitaron la mayor parte del siglo xx para desarrollar por completo las matemáticas necesarias para describir dicha actividad cuántica de la fuerza electromagnética y las fuerzas nucleares fuerte y débil. Los esfuerzos valieron la pena: los cálculos realizados con esta herramienta matemática coinciden con los hallazgos experimentales con una precisión sin paralelo (e. g., los cálculos del efecto de las fluctuaciones del vacío sobre las propiedades magnéticas de los electrones coinciden con los resultados experimentales hasta una parte en mil millones).[12.5]

Pero a pesar de todos estos éxitos, durante muchas décadas los físicos han sido conscientes de que las agitadiones cuánticas han estado fomentando el descontento dentro de las leyes de la física.

Agitaciones y su descontento[12.6]

Hasta ahora sólo hemos discutido agitaciones cuánticas para campos que existen dentro del espacio. ¿Qué pasa con

las agitaciones cuánticas del propio espacio? Aunque esto pueda sonar misterioso, realmente es sólo otro ejemplo de agitación de campo cuántica —un ejemplo, sin embargo, que se muestra particularmente problemático—. En la teoría de la relatividad general Einstein estableció que la fuerza gravitatoria puede describirse por deformaciones y curvas en el tejido del espacio; demostró que los campos gravitatorios se manifiestan a través de la forma o la geometría del espacio (y del espaciotiem- po, con más generalidad). Ahora bien, igual que cualquier otro campo, el campo gravitatorio está sometido a agitaciones cuánticas. El principio de incertidumbre asegura que sobre escalas de distancias minúsculas, el campo gravitatorio fluctúa arriba y abajo. Y puesto que el campo gravitatorio es sinónimo de la forma del espacio, tales agitaciones cuánticas significan que la forma del espacio fluctúa aleatoriamente. Una vez más, como sucede con los ejemplos de incertidumbre cuántica, en escalas de distancias cotidianas las agitaciones son demasiado pequeñas para sentirse directamente, y el entorno circundante parece liso, plácido y predecible. Pero cuanto más pequeña es la escala de la observación, más grande es la incertidumbre, y más tumultuosas se hacen las fluctuaciones cuánticas.

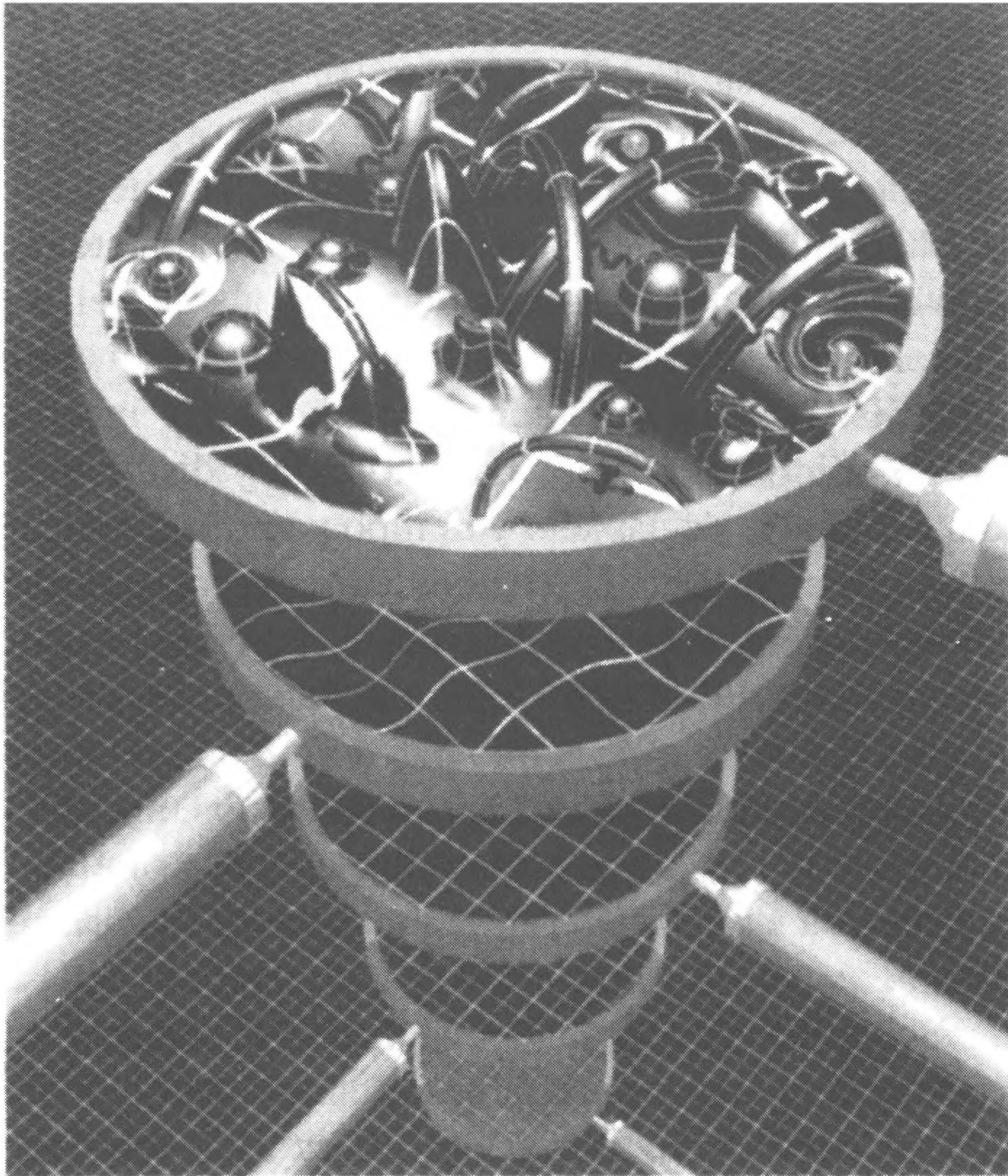


FIGURA 12.2. Amplificaciones sucesivas del espacio revelan que por debajo de la longitud de Planck el espacio se hace irreconociblemente tumultuoso debido a las agitaciones cuánticas. (Éstas son lentes de aumento imaginarias, cada una de las cuales amplifica entre 10 millones y 100 millones de veces.)

Esto se ilustra en la figura 12.2, en la que ampliamos secuencialmente el tejido del espacio para revelar su estructura a distancias cada vez menores. El nivel más bajo de la figura muestra las ondulaciones cuánticas del espacio en las escalas familiares y, como se puede ver, no hay nada que ver —las ondulaciones son inobservablemente pequeñas, de modo que el espacio parece tranquilo y plano, pero cuando seguimos ampliando secuencialmente la región, vemos que las ondulaciones del espacio se hacen cada vez más frenéticas—. En el nivel superior de la figura, que muestra el tejido del espacio a escalas más pequeñas que la *longitud de Planck* —una milbillonésima de trillonésima (10^{-33}) de centímetro— el espacio se hace un caldero hirviente de fluctuaciones frenéticas. Como deja claro la ilustración, las nociones habituales de izquierda/derecha, atrás/adelante y arriba/abajo quedan tan revueltas en el tumulto ultramicroscópico que pierden todo significado. Incluso la noción habitual de antes/después, que hemos estado ilustrando por rebanadas secuenciales en la barra del espaciotiempo, pierde significado por las fluctuaciones cuánticas en escalas de tiempo más cortas que el *tiempo de Planck,* aproximadamente una diezmi- llonésima de trillonésima de trillonésima (10^{-43}) de segundo (que es aproximadamente el tiempo que tarda la luz en recorrer una longitud de Planck). Como una fotografía borrosa, las ondulaciones salvajes en la figura 12.2 hacen imposible distinguir inequívocamente una rebanada temporal de otra cuando el intervalo temporal entre ellas se hace más corto que el tiempo de Planck. El resultado es que en escalas más cortas que las distancias y duraciones de Planck, la incertidumbre cuántica hace el tejido del cosmos tan retorcido y distorsionado que los conceptos habituales de espacio y tiempo ya no son aplicables.

Aunque exótica en detalle, la lección de trazo grueso ilustrada por la figura 12.2 es una con la que ya estamos familiarizados: conceptos y conclusiones relevantes en una escala pueden no ser aplicables en todas las escalas. Éste es un principio clave en física, y un principio que encontramos repetidamente incluso en contextos mucho más prosaicos. Tomemos un vaso de agua. Describir el agua como un líquido suave y uniforme es a la vez útil y relevante en escalas cotidianas, pero es una aproximación que se viene abajo si analizamos el agua con precisión submicrocópica. A escalas minúsculas, la imagen suave da paso a un marco completamente diferente de moléculas y átomos ampliamente separados. Análogamente, la figura 12.2 muestra que la idea de Einstein de un espacio geométrico y un tiempo uniformes y suavemente curvados, aunque poderosa y precisa para describir el universo a grandes escalas, se viene abajo si analizamos el universo a escalas de tiempo y distancia extraordinariamente cortas. Los físicos creen que, como sucede con el agua, la imagen suave del espacio y el tiempo es una aproximación que cede paso a otro marco más fundamental cuando se considera a escalas ultramicroscópicas. Cuál es ese marco —qué constituye las «moléculas» y «átomos» de espacio y tiempo— es una cuestión que actualmente se persigue con gran vigor. Todavía está por resolver.

Incluso así, lo que queda absolutamente claro de la figura 12.2 es que en escalas minúsculas el carácter suave del espacio y el tiempo imaginado por la relatividad general se da de bruces con el carácter frenético y agitado de la mecánica cuántica. El principio central de la relatividad general de Einstein, que espacio y tiempo tienen una forma geométrica que se curva suavemente, se da de bruces con el principio central de la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre que implica un ambiente salvaje, tumultuoso

y turbulento en las escalas más minúsculas. El choque violento entre las ideas centrales de la relatividad general y la mecánica cuántica ha hecho de la fusión de las dos teorías uno de los desafíos más difíciles con que los físicos han tropezado durante los últimos ochenta años.

¿Importa?

En la práctica, la incompatibilidad entre la relatividad general y la mecánica cuántica se manifiesta de una forma muy concreta. Si usted utiliza las ecuaciones combinadas de la relatividad general y la mecánica cuántica, casi siempre dan una respuesta: infinito. Y ése es un problema. Es absurdo. Los experimentadores nunca miden una cantidad infinita de nada. Los botones de los aparatos nunca giran hasta el infinito. Los metros nunca llegan al infinito. Las calculadoras nunca registran infinito. Casi siempre, una respuesta infinita carece de significado. Todo lo que nos dice es que las ecuaciones de la relatividad general y de la mecánica cuántica, cuando se fusionan, pierden sentido.

Nótese que esto es totalmente distinto de la tensión entre relatividad especial y mecánica cuántica a la que llegamos en nuestra discusión de la no localidad cuántica en el capítulo 4. Allí encontramos que reconciliar las principios de la relatividad especial (en particular, la simetría entre todos los observadores a velocidad constante) con el comportamiento de las partículas entrelazadas requiere una comprensión más completa del problema de la medida cuántica que la que se ha conseguido hasta ahora (ver páginas 159-163). Pero esta cuestión no completamente resuelta no da lugar a inconsistencias matemáticas o a ecuaciones que den respuestas absurdas. Por el contrario, las ecuaciones combinadas de la relatividad especial y la

mecánica cuántica han sido utilizadas para hacer las predicciones confirmadas con más exactitud en la historia de la ciencia. La tensión silencios entre relatividad especial y mecánica cuántica apunta a un área que necesita más desarrollo teórico, pero apenas tiene ningún impacto en su poder pre- dictivo combinado. No sucede lo mismo con la unión explosiva entre relatividad general y la mecánica cuántica, en la que se pierde todo poder predictivo.

No obstante, usted puede seguir preguntando si la incompatibilidad entre relatividad general y mecánica cuántica importa realmente. Ciertamente, las ecuaciones combinadas pueden dar lugar a absurdos, pero ¿cuándo necesita realmente utilizarlas juntas? Años de observaciones astronómicas han mostrado que la relatividad general describe el ma- cromundo de estrellas, galaxias, e incluso la extensión entera del cosmos con impresionante precisión; décadas de experimentos han confirmado que la mecánica cuántica hace lo mismo para el micromundo de moléculas, átomos y partículas subatómicas. Puesto que cada teoría funciona maravillosamente en su propio dominio, ¿por qué preocuparse en combinarlas? ¿Por qué no mantenerlas separadas? ¿Por qué no utilizar la relatividad general para objetos que son grandes y masivos, la mecánica cuántica para objetos que son minúsculos y ligeros, y celebrar la impresionante hazaña de la Humanidad que supone el comprender satisfactoriamente un abanico tan amplio de fenómenos físicos?

En la práctica, esto es lo que la mayoría de los físicos han hecho desde las primeras décadas del siglo xx, y no hay que negar que ha sido un enfoque bastante fructífero. El progreso que ha hecho la ciencia trabajando en este marco disjunto es impresionante. Sin embargo, hay varias razones

por las que el antagonismo entre la relatividad general y la mecánica cuántica debe reconciliarse. He aquí dos de ellas.

En primer lugar, a un nivel visceral es difícil aceptar que la comprensión más profunda del universo consiste en una unión incómoda entre dos poderosos marcos teóricos que son mutuamente incompatibles. El universo no viene equipado con una línea en la arena que separa los objetos que son adecuadamente descritos por la mecánica cuántica de los objetos adecuadamente descritos por la relatividad general. Dividir el universo en dos dominios separados parece artificial y caprichoso. Para muchos, esto es prueba de que debe haber una verdad más profunda y unificada que supera el abismo entre relatividad general y mecánica cuántica y que puede aplicarse a *cualquier cosa.* Tenemos un universo y, por lo tanto, muchos creen firmemente que deberíamos tener una teoría.

En segundo lugar, aunque la mayoría de los objetos son o grandes y pesados o pequeños y ligeros, y por consiguiente, en la práctica, pueden describirse utilizando la relatividad general o la mecánica cuántica, esto no es cierto para todos los objetos. Los agujeros negros proporcionan un buen ejemplo. Según la relatividad general, toda la materia que constituye un agujero negro está comprimida en un único punto minúsculo en el centro del agujero negro.[12.7] Esto hace el centro de un agujero negro enormemente masivo e increíblemente minúsculo, y con ello cae a ambos lados de la divisoria propuesta: necesitamos utilizar la relatividad general porque la masa grande crea un campo gravitatorio importante, y también tenemos que utilizar la mecánica cuántica porque toda la masa está comprimida en un tamaño minúsculo. Pero en combinación, las ecuaciones dejan de ser válidas, de modo que nadie ha sido capaz de determinar lo que sucede precisamente en el centro de un agujero negro.

Éste es un buen ejemplo, pero si usted es un escéptico real, aún podría preguntar si esto es algo que no dejará dormir por la noche. Puesto que no podemos ver dentro de un agujero negro a menos que saltemos a su interior y, además, si saltáramos al interior no seríamos capaces de comunicar nuestras observaciones al mundo exterior, nuestra comprensión incompleta del interior de un agujero negro quizá no le parezca particularmente preocupante. Para los físicos, sin embargo, la existencia de un dominio en el que dejan de ser válidas las leyes conocidas de la física —por muy esotérico que el dominio pudiera parecer— levanta las banderas de alarma. Si las leyes conocidas de la física dejan de ser válidas bajo cualesquiera circunstancias, es una clara señal de que no hemos alcanzado el conocimiento más profundo posible. Después de todo, el universo funciona; hasta donde podemos decir, el universo no se viene abajo. La teoría correcta del universo debería satisfacer, como mínimo, el mismo estándar.

Bien, eso ciertamente parece razonable. Pero para mí, la plena urgencia del conflicto entre relatividad general y mecánica cuántica se revela solamente a través de otro ejemplo. Mire de nuevo la figura 10.6. Como puede ver, hemos dado grandes zancadas al componer una historia consistente y predictiva de la evolución cósmica, pero la imagen sigue siendo incompleta debido a la región borrosa cerca del nacimiento del universo. Y dentro de la neblina de estos primerísimos instantes hay una intuición sobre el más tentador de los misterios: el origen y naturaleza fundamental del espacio y el tiempo. ¿Qué nos ha impedido penetrar en la niebla? La culpa recae directamente en el conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica. El antagonismo entre las leyes de lo grande y las de lo pequeño es la razón de que la región borrosa permanezca

oscura y todavía no tengamos una idea de lo que sucedió en el comienzo mismo del universo.

Para entender por qué, imagine, como en el capítulo 10, que pasa una película del cosmos en expansión al revés, hacia el *big bang.* Al revés, todo lo que ahora se está apartando se acerca, y por eso, cuando más atrás vamos en la película, más pequeño, más caliente y más denso se hace el universo. Cuando nos acercamos al instante cero, el universo observable entero está comprimido en un tamaño similar al del Sol, luego más comprimido en el tamaño de la Tierra, luego estrujado hasta el tamaño de una bola de bolos, un guisante, un grano de arena —el universo se contrae cada vez a medida que la película se rebobina hacia sus fotogramas iniciales—. Llega un momento en esta película pasada al revés en el que todo el universo conocido tiene un tamaño cercano a la longitud de Planck —la milbillonésima de trillonésima de centímetro en la que la relatividad general y la mecánica cuántica se encuentran enfrentadas—. En este momento toda la masa y toda la energía responsables de generar el universo observable están contenidas en una mota que es menor que una centésima de trillonésima del tamaño de un simple átomo. **[12.8]**

Así pues, como sucede en el caso del centro de un agujero negro, el universo primitivo cae a ambos lados de la divisoria. La enorme densidad del universo primitivo requiere el uso de la relatividad general. El minúsculo tamaño del universo primitivo requiere el uso de la mecánica cuántica. Pero una vez más, en combinación las leyes se vienen abajo. El proyector se atranca, la película cósmica se quema, y somos incapaces de acceder a los primerísimos instantes del universo. Debido al conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica, seguimos ignorantes de lo que sucedió en el principio y nos

vemos reducidos a dibujar una región borrosa en la figura 10.6.

Si queremos entender alguna vez el origen del universo —una de las preguntas más profundas de toda la ciencia— *debemos* resolver el conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica. Debemos zanjar las diferencias entre las leyes de lo grande y las leyes de lo pequeño y fundirlas en una única teoría armoniosa.

El improbable camino a una solución[*33]

Como ejemplifica la obra de Newton y Einstein, las grandes ideas científicas nacen a veces del genio de un único científico, puro y simple. Pero eso es raro. Con mucha más frecuencia las grandes ideas representan el esfuerzo colectivo de muchos científicos, cada uno de los cuales construye sobre las ideas de los otros para conseguir lo que ningún individuo podría haber conseguido aisladamente. Un científico podría aportar una idea que pone en marcha el pensamiento de un colega, que lleva a una observación que revela una relación inesperada que inspira un avance importante, lo que inicia de nuevo el ciclo de descubrimiento. Conocimiento amplio, facilidad técnica, flexibilidad de pensamiento, apertura a conexiones inesperadas, inmersión en el flujo libre de ideas, trabajo duro y suerte son las partes críticas del descubrimiento científico. En tiempos recientes quizá no ha habido un avance más importante que ejemplifique esto mejor que el desarrollo de la *teoría de supercuerdas.*

La teoría de supercuerdas es una aproximación que muchos científicos creen que fusiona satisfactoriamente la relatividad general y la mecánica cuántica. Y como veremos, hay razones para esperar aún más. Aunque hay

todavía mucho trabajo en marcha, la teoría de supercuerdas puede ser una teoría completamente unificada de todas las fuerzas y toda la materia, una teoría que alcance el sueño de Einstein y más allá —una teoría, creemos yo y muchos otros, que está señalando los inicios de un camino que nos llevará un día a las más profundas leyes del universo—. A decir verdad, sin embargo, la teoría de supercuerdas no estaba concebida como un medio ingenioso para alcanzar estos viejos y nobles objetivos. En su lugar, la historia de la teoría de supercuerdas está llena de descubrimientos accidentales, salidas en falso, oportunidades erradas y casi carreras hundidas. Es también, en un sentido preciso, la historia del descubrimiento de la solución correcta al problema erróneo.

En 1968, Gabriele Veneziano, un joven investigador posdoctoral que trabajaba en el CERN, era uno de los muchos físicos que trataban de entender la fuerza nuclear fuerte estudiando los resultados de colisiones de partículas de alta energía producidas en aceleradores de átomos en todo el mundo. Tras meses de analizar pautas y regularidades en los datos, Veneziano reconoció una conexión sorprendente e inesperada con un área esotérica de las matemáticas. Se dio cuenta de que una fórmula con doscientos años de antigüedad descubierta por el famoso matemático suizo Leonhard Euler (la *función beta de Euler)* parecía encajar con precisión los datos de la fuerza nuclear fuerte. Aunque esto pudiera no sonar particularmente anormal —los físicos teóricos trabajan continuamente con fórmulas arcanas— era un caso sorprendente de un carro que rueda kilómetros por delante del caballo. En la mayor parte de los casos los físicos elaboran primero una intuición, una imagen mental, una amplia idea de los principios físicos subyacentes a lo que quiera que estén estudiando, y sólo entonces buscan las ecuaciones necesarias para basar su

intuición en matemáticas rigurosas. Veneziano, por el contrario, saltó directo a la ecuación; su brillantez consistió en reconocer pautas inusuales en los datos y establecer el vínculo imprevisto con una fórmula concebida siglos antes por intereses puramente matemáticos. Pero aunque Veneziano tenía la fórmula a mano, no tenía ninguna explicación de por qué funcionaba. Carecía de una imagen física de por qué la función beta de Euler debería ser relevante para las partículas que se influyen mutuamente a través de la fuerza nuclear fuerte. En menos de dos años la situación cambió por completo. En 1970, artículos de Leonard Susskind de Standford, Holger Nielsen del Instituto Niels Bohr y Yohichiro Nam- bu de la Universidad de Chicago revelaron los soportes físicos del descubrimiento de Veneziano. Estos físicos demostraron que si la fuerza fuerte entre dos partículas fuera debida a una hebra minúscula, extraordinariamente delgada, casi como una goma elástica que conectara las partículas, entonces los procesos cuánticos que Veneziano y otros habían estado examinando se describirían matemáticamente utilizando la fórmula de Euler. Las pequeñas hebras elásticas fueron bautizadas como *cuerdas* y ahora, colocado el caballo adecuadamente delante del carro, la teoría de cuerdas había nacido oficialmente.

Pero no saque aún el champán. Para los implicados en esta investigación, era gratificante entender el origen físico de la intuición de Veneziano, puesto que sugería que los físicos estaban en el camino para desenmascarar la fuerza nuclear fuerte. Pese a todo, el descubrimiento no fue acogido con entusiasmo universal. Lejos de ello. Muy lejos. De hecho, el artículo de Susskind fue devuelto por la revista a la que lo envió con el comentario de que el trabajo era de mínimo interés, una valoración que Susskind recuerda muy bien: «Estaba desconcertado, me caía de la silla, estaba

deprimido, así que me fui a casa y me puse a beber».[12.9] Finalmente, su artículo y los otros que anunciaban el concepto de cuerda fueron publicados, pero eso fue no mucho antes de que la teoría sufriera otros dos reveses devastadores. Una examen detallado de datos más refinados sobre la fuerza nuclear fuerte, recogidos durante los primeros años de la década de 1970, mostraron que la aproximación de la cuerda no podía describir adecuadamente los resultados más recientes. Además, una nueva propuesta llamada *cromodiná- mica cuántica,* que estaba firmemente enraizada en los ingredientes tradicionales de partículas y campos —nada de cuerdas en absoluto— fue capaz de describir convincentemente todos los datos. Y así, en 1974 la teoría de cuerdas había recibido un doble K. O. O así parecía.

John Schwarz era uno de los primeros entusiastas de las cuerdas. En una ocasión me dijo que desde el primer momento él había tenido una sensación visceral de que la teoría era profunda e importante. Schwarz pasó varios años analizando sus diversos aspectos matemáticos; entre otras cosas, esto llevó al descubrimiento de la teoría de supercuerdas —como veremos, un refinamiento importante de la propuesta de cuerdas original—. Pero con el ascenso de la cromodinámi- ca cuántica y el fracaso del marco de las cuerdas para describir la fuerza fuerte, la justificación para seguir trabajando en teoría de cuerdas empezaba a agotarse. No obstante, había un desajuste concreto ente la teoría de cuerdas y la fuerza nuclear fuerte que seguía molestando a Schwarz, y él encontró que no podía dejarla. Las ecuaciones mecano- cuánticas de la teoría de cuerdas predecían que una partícula concreta bastante inusual debería ser producida copiosamente en las colisiones a alta energía que tienen lugar en los aceleradores de átomos. La partícula tendría masa nula, como un fotón, pero la teoría

de cuerdas predecía que tendría *espín dbs,* lo que significa, hablando en términos generales, que giraría el doble de rápido que un fotón. Ninguno de los experimentos había encontrado nunca una partícula semejante, de modo que ésta parecía estar entre las predicciones erróneas de la teoría de cuerdas.

Schwarz y su colaborador Joél Scherk se devanaron los sesos con este caso de una partícula ausente, hasta que en un magnífico salto establecieron una conexión con un problema completamente diferente. Aunque nadie había sido capaz de combinar la relatividad general y la mecánica cuántica, los físicos habían determinado ciertas características que surgirían de una unión acertada. Y, como se indicó en el capítulo 9, una característica que encontraron era que de la misma forma que una fuerza electromagnética es transmitida microscópicamente por fotones, la fuerza gravitatoria debería ser transmitida microscópicamente por otra clase de partículas, los gravitones (los paquetes cuánticos más elementales de la gravedad). Aunque los gravitones todavía no han sido detectados experimentalmente, todos los análisis teóricos coinciden en que los gravitones deben tener dos propiedades: deben carecer de masa y deben tener espín dos. Para Schwarz y Scherk esto hizo sonar una campana —éstas eran precisamente las propiedades de la partícula predicha por la teoría de cuerdas— y les inspiró a hacer una jugada atrevida, una que iba a transformar un fallo de la teoría de cuerdas en un éxito sorprendente.

Ellos propusieron que la teoría de cuerdas no debería considerarse como una teoría mecanocuántica de la fuerza nuclear fuerte. Argumentaron que incluso si la teoría había sido descubierta en un intento de comprender la fuerza fuerte, era en realidad la solución a un problema diferente. Era en realidad la primera teoría mecanocuántica de la

fuerza *gravitatoria.* Afirmaron que la partícula sin masa de espín dos predicha por la teoría de cuerdas era el gravitón, y que las ecuaciones de la teoría de cuerdas incorporaban necesariamente una descripción mecanocuántica de la gravedad.

Schwarz y Scherk publicaron su propuesta en 1974 y esperaban una reacción importante por parte de la comunidad física. Pero su trabajo fue ignorado. Visto en retrospectiva, no es difícil entender por qué. Para algunos parecía que el concepto de cuerda se había convertido en una teoría en busca de una aplicación. Parecía que, una vez que el intento de utilizar la teoría de cuerdas para explicar la fuerza nuclear fuerte había fracasado, sus proponentes no aceptaban la derrota y, en su lugar, estaban decididos a encontrar relevancia para la teoría en otro lugar. Se añadió gasolina al fuego de esta visión cuando se hizo evidente que Schwarz y Scherk necesitaban cambiar el tamaño de las cuerdas en su teoría de forma radical para que la fuerza transmitida por los candidatos a gravitón tuviera la intensidad conocida y familiar de la gravedad. Puesto que la gravedad es una fuerza extraordinariamente débil y puesto que, como es el caso, cuanto más larga es la cuerda, más fuerte es la fuerza transmitida, Schwarz y Scherk encontraron que las cuerdas tenían que ser extraordinariamente minúsculas para transmitir una fuerza con la débil intensidad de la gravedad; tenían que tener un tamaño de aproximadamente la longitud de Planck, cien trillones de veces menor que el imaginado previamente. Tan pequeño, señalaban sardónicamente los escépticos, que no había ningún aparato que fuera capaz de verlas, lo que significaba que la teoría no podía ser puesta a prueba experimentalmente./1[12.10]

Por el contrario, la década de 1970 fue testigo de un éxito tras otro para las teorías más convencionales y no

basadas en cuerdas, formuladas con partículas puntuales y campos. Teóricos y experimentadores por igual tenían la cabeza y las manos llenas de ideas concretas para investigar y predicciones para comprobar. ¿Por qué dirigirse a la teoría de cuerdas especulativa cuando había tanto trabajo excitante que hacer dentro de un marco de ensayo y error? En el mismo sentido, aunque los físicos eran conscientes de que el problema de fundir gravedad y mecánica cuántica permanecía irresuelto utilizando métodos convencionales, no era un problema que llamara la atención. Casi todos reconocían que era una cuestión importante que habría que abordar algún día, pero con la riqueza de trabajo aún por hacer sobre las fuerzas no gravitatorias, el problema de cuantizar la gravedad fue relegado a un rincón y, finalmente, a mitad de la década de 1970 la teoría de cuerdas estaba lejos de haber sido completamente desarrollada. Tener un candidato para el gravitón era un éxito, pero todavía había que abordar muchas cuestiones conceptuales y técnicas. Parecía bastante plausible que la teoría fuera incapaz de superar una o más de estas cuestiones, de modo que trabajar en la teoría de cuerdas significaba correr un riesgo considerable. En pocos años la teoría podría estar muerta.

Schwarz no se arredró. Creía que el descubrimiento de la teoría de cuerdas, la primera aproximación plausible para describir la gravedad en el lenguaje de la mecánica cuántica, era una idea importante. Si nadie quería oír, allá ellos. Él seguiría y desarrollaría la teoría, de modo que cuando la gente estuviera dispuesta a prestar atención, la teoría de cuerdas estaría mucho más avanzada. Su determinación se mostró profética.

A finales de los setenta y principios de los ochenta, Schwarz formó equipo con Michael Green, entonces en el Queen Mary College de Londres, y ambos se propusieron

trabajar en uno de los obstáculos técnicos a los que se enfrentaba la teoría de cuerdas. Principal entre éstos era el problema de las *anomalías.* Los detalles no importan, pero, hablando en términos generales, una anomalía es un efecto cuántico pernicioso que condena a una teoría pues da a entender que viola ciertos principios sagrados, tales como la conservación de la energía. Para ser viable, una teoría debe estar libre de anomalías. Las investigaciones iniciales habían revelado que la teoría de cuerdas estaba plagada de anomalías, lo que era una de las principales razones técnicas por las que no había generado mucho entusiasmo. Las anomalías significaban que aunque la teoría de cuerdas parecía proporcionar una teoría cuántica de la gravedad, puesto que contenía gravitones, en una inspección más detallada la teoría adolecía de sus propias y sutiles inconsistencias matemáticas.

Sin embargo, Schwarz se dio cuenta de que la situación no era clara. Había una posibilidad —nada segura— de que un cálculo completo revelara que las diversas contribuciones cuánticas a las anomalías que afectaban a la teoría de cuerdas se cancelaran mutuamente cuando se combinaran de la forma correcta. Junto con Green, Schwarz emprendió la ardua tarea de calcular estas anomalías, y en el verano de 1984 los dos tuvieron su recompensa. Una noche tormentosa, trabajando hasta altas horas en el Centro Aspen de Física en Colorado, completaron uno de los más importantes cálculos del campo —un cálculo que demostraba que todas las anomalías potenciales se cancelaban mutuamente de una forma que parecía casi milagrosa. La teoría de cuerdas, revelaron, estaba libre de anomalías y por ello no adolecía de ninguna inconsistencia matemática. La teoría de cuerdas, demostraron convincentemente, era mecanocuánticamente viable.

Esta vez los físicos escucharon. Era a mediados de la década de 1980 y el clima en física había cambiado considerablemente. Muchas de las características esenciales de las tres fuerzas no gravitatorias habían sido calculadas teóricamente y confirmadas experimentalmente. Aunque quedaban por resolver detalles importantes —y algunos aún no lo están— la comunidad estaba dispuesta a abordar el siguiente problema importante: la fusión de la relatividad general y la mecánica cuántica. Entonces, desde un poco conocido rincón de la física, Green y Schwarz entraron en escena con una propuesta definida, matemáticamente consistente y estéticamente agradable sobre cómo proceder. Casi de la noche a la mañana, el número de investigadores que trabajaban en teoría de cuerdas saltó de dos a más de un millar. La primera revolución de las cuerdas estaba en marcha.

La primera revolución

Yo empecé mis estudios en la facultad en la Universidad de Oxford en el otoño de 1984, y al cabo de unos pocos meses los pasillos bullían con rumores de una revolución en física. Puesto que todavía no se había extendido el uso de Internet, el rumor era el canal dominante para la difusión rápida de la información, y cada día traía noticia de nuevos avances. Los investigadores comentaban que la atmósfera estaba cargada de un modo que no se había visto desde los primeros días de la mecánica cuántica, y se decía seriamente que el fin de la física teórica estaba al alcance.

La teoría de cuerdas era nueva para casi todo el mundo, de modo que en aquellos primeros días sus detalles no eran de conocimiento común. Nosotros fuimos particularmente afortunados en Oxford: Michael Green nos había visitado

recientemente para dar lecciones sobre teoría de cuerdas, de modo que muchos de nosotros estábamos familiarizados con las ideas básicas y las afirmaciones esenciales de la teoría. Y las afirmaciones eran realmente impresionantes. En pocas palabras, esto es lo que decía la teoría:

Tome cualquier trozo de materia —un bloque de hielo, un pedazo de roca, una tableta de hierro— e imagine que lo corta por la mitad, y luego corta de nuevo una de las piezas por la mitad y así sucesivamente; imagine que corta continuamente el material en piezas cada vez más pequeñas. Hace unos 2.500 años, los antiguos griegos habían planteado el problema de determinar los ingredientes más finos e indivisibles que serían el producto final de semejante procedimiento. En nuestra época hemos aprendido que más pronto o más tarde se llega a los átomos, pero los átomos no son la respuesta a la pregunta de los griegos, porque pueden fragmentarse en constituyentes más finos. Los átomos pueden dividirse. Hemos aprendido que constan de electrones que pululan en tomo a un núcleo central que está compuesto de otras partículas aún más finas: protones y neutrones. Y a finales de la década de 1960, experimentos en el Acelerador Lineal de Stanford revelaron que incluso los propios neutrones y protones están hechos de constituyentes más fundamentales: cada protón y cada neutrón consiste en tres partículas conocidas como quarks, como se mencionó en el capítulo 9 y se ilustra en la figura 12.3a.

La teoría convencional, apoyada por los experimentos actuales, concibe los electrones y los quarks como puntos sin ninguna extensión espacial; de esta forma, por consiguiente, marcan el final de la línea —la última de las muñecas rusas de la Naturaleza a encontrar en la constitución microscópica de la materia—. Aquí es donde hace su aparición la teoría de cuerdas. La teoría de cuerdas

desafía la imagen convencional al proponer que electrones y quarks *no* son partículas de tamaño cero. Según la teoría de cuerdas el modelo convencional de partícula-puntual es una aproximación a una descripción más refinada en la que cada partícula es en realidad un filamento de energía minúsculo y vibrante, llamado una *cuerda,* como se puede ver en la figura 12.3b. Se supone que estas hebras de energía vibrante no tienen grosor, sólo longitud, y por eso las cuerdas son entidades unidimensionales. Pero, puesto que las cuerdas son tan pequeñas, unos cien trillones de veces más pequeñas que un simple núcleo atómico (10^{-33} centímetros), parecen ser puntos incluso cuando las examinamos con nuestros aceleradores más avanzados.

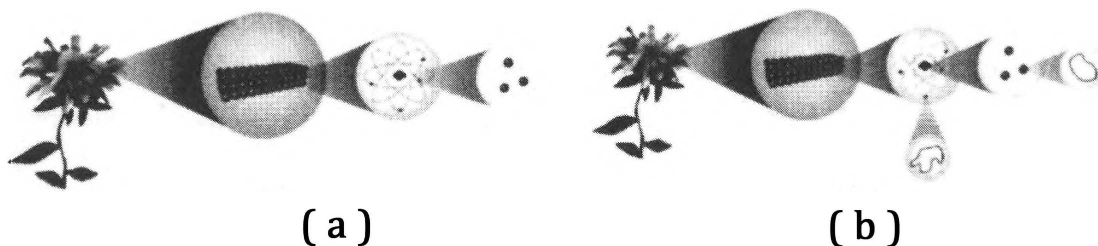


FIGURA 12.3. (a) La teoría convencional se basa en electrones y quarks como los constituyentes básicos de la materia, **(b)** La teoría de cuerdas sugiere que cada partícula es en realidad una cuerda vibrante.

Puesto que nuestra comprensión de la teoría de cuerdas está lejos de ser completa, nadie sabe con seguridad si la historia termina aquí —si, suponiendo que la teoría es correcta, las cuerdas son realmente la última muñeca rusa, o si las propias cuerdas podrían estar compuestas de ingredientes aún más finos—. Volveremos a esta cuestión, pero de momento sigamos el desarrollo histórico del tema e imaginemos que las cuerdas son realmente donde todo

termina; imaginemos que las cuerdas son los ingredientes más elementales del universo.

Teoría de cuerdas y unificación

Esto es en resumen la teoría de cuerdas, pero para transmitir la potencia de esta nueva aproximación tengo que describir un poco más en detalle la física de partículas convencional. Durante los últimos cien años, los físicos han pinchado, aporreado y pulverizado la materia en busca de los constituyentes elementales del universo. Y, de hecho, han encontrado que en casi todo con lo que alguien ha tropezado alguna vez los ingredientes fundamentales son los electrones y los quarks recién mencionados —más exactamente, como en el capítulo 9, electrones y dos tipos de quarks, quarks-up y quarks-down, que difieren en masa y carga eléctrica—. Pero los experimentos revelaron también que el universo tiene otros tipos de partículas más exóticas que no aparecen en la materia ordinaria. Además de quarks-up y quarks-down, los experimentadores han identificado otros cuatro tipos de quarks *(quarks-charm, quarks-strange, quarks-bottom* y *quarks-top)* y otros dos tipos de partículas que son muy parecidas a los electrones sólo que más pesadas *(muones* y *taus).* Es probable que estas partículas abundaran inmediatamente después del *big bang,* pero hoy sólo son producidas como los detritus efímeros de colisiones de alta energía entre los tipos de partículas más familiares. Finalmente, los experimentadores han descubierto también tres tipos de partículas fantasmales llamadas *neutrinos (neutrinos electrónicos, neutrinos muónicos* y *neutrinos tau)* que pueden atravesar billones de kilómetros de plomo con tanta facilidad como nosotros atravesamos el aire. Estas partículas —el electrón y sus dos primos más pesados, los

seis tipos de quarks y los tres tipos de neutrinos—constituyen la respuesta de un físico de partículas actual a la pregunta de los antiguos griegos sobre la constitución de la materia.[12.11]

La lista de los tipos de partículas puede organizarse en tres «familias» o «generaciones» de partículas, como en la tabla 12.1. Cada familia tiene dos de los quarks, uno de los neutrinos y una de las partículas del tipo del electrón; la única diferencia entre partículas correspondientes en cada familia es que sus masas aumentan en cada familia sucesiva. La división en familias sugiere ciertamente una pauta subyacente, pero el aluvión de partículas puede provocarle mareos (o, peor, hacer que sus ojos se pongan vidriosos). Espere, no obstante, porque una de las características más bellas de la teoría de cuerdas es que proporciona un medio para domar esta aparente complejidad.

TABLA 12.1. Las tres familias de partículas fundamentales y sus masas (en múltiplos de la masa del protón). Se sabe que los valores de las masas de los neutrinos son distintos de cero, pero sus valores exactos han eludido hasta ahora la determinación experimental

Familia 1		*Familia 2*		*Familia 3*	
Partícula	*Masa*	*Partícula*	*Masa*	*Partícula*	*Masa*
Electrón	0,00054	Muón	0,11	Tau	1,9
Neutrino electrónico	$< 10^{-9}$	Neutrino muónico	$< 10^{-4}$	Neutrino tau	$< 10^{-3}$
Quark-up	0,0047	Quark-charm	1,6	Quark-top	189
Quark down	0,0074	Quark-strange	0,16	Quark-bottom	5,2

Según la teoría de cuerdas, hay sólo un ingrediente fundamental —la cuerda— y la riqueza de tipos de partículas refleja simplemente las diferentes pautas

vibracionales que puede ejecutar una cuerda. Es parecido a lo que sucede con cuerdas más familiares como las de un violín o un violonchelo. Una cuerda de violonchelo puede vibrar de muchas maneras diferentes, y oímos cada pauta como una nota musical diferente. De esta forma, una cuerda de violonchelo puede producir un abanico de sonidos diferentes. Las cuerdas en la teoría de cuerdas se comportan de forma similar: también pueden vibrar en pautas diferentes. Pero en lugar de dar diferentes tonos musicales, *las diferentes pautas vibracionales en la teoría de cuerdas corresponden a diferentes tipos de partículas.* La idea clave es que la pauta de vibración detallada ejecutada por una cuerda produce una masa específica, una carga eléctrica específica, un espín específico y así sucesivamente —es decir, la lista específica de propiedades que distingue un tipo de partícula de otro—. Una cuerda que vibra con una pauta particular podría tener las propiedades de un electrón, mientras que una cuerda que vibra con una pauta diferente podría tener las propiedades de un quark up, un quark down, o cualquiera de los otros tipos de partículas de la tabla 12.1. No es que una «cuerda electrónica» constituya un electrón, o una «cuerda quark up» constituya un quark up, o una «cuerda quark down» constituya un quark down. Se trata, más bien, de que un tipo *únicos* de cuerdas pueden explicar una gran variedad de partículas porque la cuerda puede ejecutar una gran variedad de pautas vibracionales.

Como puede ver, esto representa un paso potencialmente gigante hacia la unificación. Si la teoría de cuerdas es correcta, la lista de partículas mareante de la tabla 12.1 muestra el repertorio vibracional de un único ingrediente básico. Hablando metafóricamente, las diferentes notas que pueden ser tocadas por un único tipo de cuerda explicarían todas las diferentes partículas que

han sido detectadas. En el nivel ultramicroscópico, el universo sería parecido a una sinfonía de cuerdas que da existencia a la materia.

Éste es un marco deliciosamente elegante para explicar las partículas en la tabla 12.1, pero la unificación propuesta por la teoría de cuerdas va aún más lejos. En el capítulo 9 y en nuestra discusión anterior observamos cómo las fuerzas de la Naturaleza son transmitidas en el nivel cuántico por otras partículas, las partículas mensajeras que están resumidas en la tabla 12.2. La teoría de cuerdas explica las partículas mensajeras exactamente igual que explica las partículas de materia. A saber, cada partícula mensajera es una cuerda que está ejecutando una pauta vibracional particular. Un fotón es una cuerda que vibra con una pauta particular, una partícula W es una cuerda que vibra con una pauta diferente, un gluón es una cuerda que vibra con otra pauta. Y, de importancia primordial, lo que Schwarz y Scherk demostraron en 1971 es que hay una pauta vibracional particular que tiene todas las propiedades de un gravitón, de modo que la fuerza gravitatoria está incluida en el marco mecanocuántico de la teoría de cuerdas. Así, no sólo las partículas de materia surgen de cuerdas vibrantes, sino que también lo hacen las partículas mensajeras —incluso la partícula mensajera de la gravedad.

TABLA 12.2. Las cuatro fuerzas de la Naturaleza, junto con sus partículas de fuerza asociadas y sus masas en términos de la masa del protón. (En realidad hay dos partículas W —una con carga +1 y otra con carga -1— que tienen la misma masa; por simplicidad ignoramos este detalle y llamamos a ambas partícula W).

Fuerza	Partícula de la fuerza	Masa
Fuerte	Gluón	0
Electromagnética	Fotón	0
Débil	W, Z	86, 97
Gravedad	Gravitón	0

Y así, además de ofrecer la primera aproximación satisfactoria para fusionar gravedad y mecánica cuántica, la teoría de cuerdas reveló su capacidad para proporcionar una descripción unificada de toda la materia y todas las fuerzas. Ésa es la afirmación que hizo agitarse a miles de físicos en sus sillas a mediados de la década de 1980; cuando se levantaron y se limpiaron el polvo, muchos se habían convertido.

¿Por qué funciona la teoría de cuerdas?

Antes del desarrollo de la teoría de cuerdas, el camino del progreso científico estaba lleno de intentos insatisfactorios por fusionar la gravedad y la mecánica cuántica. Entonces, ¿qué hay en la teoría de cuerdas que le ha permitido tener este éxito? Hemos contado cómo Schwarz y Scherk descubrieron, para su sorpresa, que una pauta vi- bracional particular de una cuerda tenía las propiedades correctas para la partícula gravitón, lo que les llevó a afirmar que la teoría de cuerdas proporcionaba un marco a medida para fusionar las dos teorías. Históricamente es así como surgió fortuitamente el poder y la promesa de la teoría de cuerdas, pero esto no explica muy bien por qué la aproximación de las cuerdas triunfó donde todos los demás intentos fallaban. La figura 12.2 resume el conflicto entre la relatividad

general y la mecánica cuántica —a escalas de distancia ultracortas, el frenesí de la incertidumbre cuántica se hace tan violento que el modelo geométrico uniforme del espaciotiempo subyacente a la relatividad general se viene abajo— de modo que la pregunta es ¿cómo resuelve el problema la teoría de cuerdas? ¿Cómo la teoría de cuerdas calma las tumultuosas fluctuaciones del espaciotiempo a distancias ultramicroscópicas?

La principal característica novedosa de la teoría de cuerdas es que su ingrediente básico no es una partícula puntual —un punto sin tamaño— sino que es un objeto que tiene extensión espacial. Esta diferencia es la clave del éxito de la teoría de cuerdas para fusionar la gravedad y la mecánica cuántica.

El frenesí salvaje representado en la figura 12.2 surge de aplicar el principio de incertidumbre al campo gravitatorio; en escalas cada vez más pequeñas, el principio de incertidumbre implica que las fluctuaciones en el campo gravitatorio se hacen cada vez más grandes. No obstante, a escalas de distancia tan extraordinariamente minúsculas deberíamos describir el campo gravitatorio en términos de sus constituyentes fundamentales, los gravitones, de la misma manera que a escalas moleculares deberíamos describir el agua en términos de moléculas de H_2O. En este lenguaje, las frenéticas ondulaciones del campo gravitatorio deberían considerarse como grandes números de gravitones saltando incontroladamente en una dirección u otra, como motas de polvo y suciedad atrapadas en un feroz tomado. Ahora bien, si los gravitones fueran partículas puntuales (como se imaginaban en todos los anteriores y fallidos intentos de fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica), la figura 12.2 reflejaría con precisión su comportamiento colectivo: escalas de distancia cada vez

más cortas, agitación cada vez mayor. Pero la teoría de cuerdas cambia esta conclusión.

En la teoría de cuerdas cada gravitón es una cuerda vibrante —algo que no es un punto, sino que tiene un tamaño aproximado de una longitud de Planck (10^{3}’ centímetros).[12.12] Y puesto que los gravitones son los constituyentes más finos y más elementales de un campo gravitatorio, no tiene sentido hablar del comportamiento de campos gravitatorios en escalas de longitud subPlanck. De la misma forma que la resolución de la pantalla de su televisor está limitada por el tamaño de los píxeles individuales, la resolución del campo gravitatorio en la teoría de cuerdas está limitada por el tamaño de los gravitones. Así, el tamaño no nulo de los gravitones (y de cualquier otra cosa) en la teoría de cuerdas establece un límite, aproximadamente en la escala de Planck, al detalle con que puede resolverse un campo gravitatorio.

Esta es la idea crucial. Las fluctuaciones cuánticas incontrolables ilustradas en la figura 12.2 aparecen solamente cuando consideramos incertidumbre cuántica en escalas de distancia arbitrariamente cortas —escalas más cortas que la longitud de Planck—. En una teoría basada en partículas puntuales de tamaño nulo, una aplicación semejante del principio de incertidumbre está prohibida y, como vemos en la figura, esto nos lleva a un terreno salvaje fuera del alcance de la relatividad general de Einstein. Sin embargo, una teoría basada en cuerdas incluye un seguro. En la teoría de cuerdas las cuerdas son los ingredientes más pequeños, de modo que nuestro viaje a lo ultramicroscópico acaba cuando alcanzamos la longitud de Planck —el tamaño de las propias cuerdas—. En la figura 12.2, la escala de Planck está representada por el segundo nivel más alto; como se puede ver, en tales escalas sigue habiendo ondulaciones en el tejido espacial porque el campo

gravitatorio sigue estando sujeto a agitaciones cuánticas. Pero las agitaciones son suficientemente suaves para evitar un conflicto irreparable con la relatividad general. Las matemáticas precisas que subyacen a la relatividad general deben ser modificadas para incorporar estas ondulaciones cuánticas, pero esto puede hacerse y las matemáticas siguen siendo razonables.

Así, limitando cuán pequeño uno puede hacerse, la teoría de cuerdas limita la violencia que pueden alcanzar las agitaciones del campo gravitatorio —y el límite es suficientemente grande para evitar el choque catastrófico entre mecánica cuántica y relatividad general. De esta manera, la teoría de cuerdas reduce el antagonismo entre los dos marcos y es capaz, por primera vez, de unirlos.

El tejido cósmico en el reino de lo pequeño

¿Qué significa esto para la naturaleza ultramicroscópica del espacio y, con más generalidad, del espaciotiempo? Por una parte, desafía firmemente la noción convencional de que el tejido del espacio y el tiempo es continuo —que siempre se puede dividir por la mitad la distancia entre aquí y allí o la duración entre ahora y luego, y que puede hacerse de nuevo, dividiendo indefinidamente el espacio y el tiempo en unidades cada vez más pequeñas—. En su lugar, cuando descendemos a la longitud Planck (la longitud de una cuerda) y el tiempo de Planck (el tiempo que tardaría la luz en recorrer la longitud de una cuerda) y tratamos de dividir el espacio y el tiempo de forma más fina, encontramos que no se puede hacer. El concepto de «ir a lo más pequeño» deja de tener significado una vez que se llega al tamaño del constituyente más pequeño del cosmos. Para partículas de tamaño nulo esto

no introduce ninguna restricción, pero puesto que las cuerdas tienen tamaño, sí la hay. Si la teoría de cuerdas es correcta, los conceptos usuales de espacio y tiempo, el marco en el que tienen lugar todas nuestras experiencias cotidianas, simplemente no se aplica a escalas más finas que la escala de Planck —la escala de las propias cuerdas.

Respecto a qué conceptos los sustituyen, no hay todavía consenso. Una posibilidad que encaja con la explicación anterior de cómo la teoría de cuerdas funde mecánica cuántica y relatividad general es que el tejido del espacio en la escala de Planck se parezca a un retículo o una malla, en la que el «espacio» entre las líneas de la malla está fuera de los límites de la realidad física. De la misma forma que una hormiga microscópica que caminara en una pieza ordinaria de tejido tendría que saltar de una hebra a otra, quizá el movimiento a través el espacio a escalas ultramicroscópicas requiera análogamente saltos discretos de una «hebra» de espacio a otra. También el tiempo podría tener una estructura granular, con instantes individuales fuertemente empaquetados pero no fundidos en un continuo sin fisuras. En esta forma de pensar, los conceptos de intervalos de espacio y tiempo cada vez más pequeños llegarían abruptamente a un final en la escala de Planck. De la misma forma que no hay nada como una moneda americana de valor menor que un céntimo, si el espaciotiempo ultramicroscópico tuviera una estructura de malla no habría una distancia más corta que la longitud de Planck o una duración más corta que el tiempo de Planck.

Otra posibilidad es que espacio y tiempo no dejen abruptamente de tener sentido en escalas extraordinariamente pequeñas, sino que se transformen poco a poco en conceptos más fundamentales. Una contracción más pequeña que la escala de Planck estaría fuera de los límites no porque se tropiece con una malla

fundamental, sino porque los conceptos de espacio y tiempo se funden sin solución de continuidad en nociones para las que «contracción más pequeña» es tan carente de significado como preguntar si el número 9 es feliz. Es decir, podemos imaginar que a medida que el espacio y el tiempo macroscópicos familiares se transforman poco a poco en sus contrapartidas ultramicroscópicas poco familiares, muchas de sus propiedades habituales —tales como longitud y duración— se hacen irrelevantes o carentes de significado. Por ejemplo, usted puede estudiar razonablemente la temperatura y la viscosidad del agua líquida —conceptos que se aplican a las propiedades macroscópicas de un fluido— pero cuando desciende a la escala de las moléculas de H_2O estos conceptos dejan de ser significativos. Quizá, de modo análogo, aunque usted pueda dividir una y otra vez por la mitad regiones del espacio y duraciones del tiempo en las escalas cotidianas, cuando pasa a la escala de Planck ellos sufren una transformación que deja sin significado a esa división.

Muchos teóricos de cuerdas, entre los que me incluyo, sospechan que algo de este tipo sucede, pero para ir más lejos necesitamos descubrir los conceptos más fundamentales en los que se transforman el espacio y el tiempo.* Hasta la fecha ésta es una pregunta no respondida, pero la investigación de vanguardia (descrita en el último capítulo) ha sugerido algunas posibilidades con consecuencias de gran alcance.

Los puntos más finos

Con la descripción que he dado hasta ahora podría parecer desconcertante que cualquier físico se resistiese al atractivo de la teoría de cuerdas. Aquí, finalmente, hay una teoría que

promete realizar el sueño de Einstein y más; una teoría que podría sofocar la hostilidad entre la mecánica cuántica y la relatividad general; una teoría con la capacidad de unificar toda la materia y todas las fuerzas describiendo todo en términos de cuerdas vibrantes; una teoría que sugiere un reino ultramicroscópico en los que el espacio y el tiempo familiares podrían ser tan pintorescos como un teléfono con marcador de disco; una teoría, en resumen, que promete llevar nuestra comprensión del universo a todo un nuevo nivel. Pero tenga en cuenta que nadie ha visto nunca una cuerda y, salvo por algunas ideas heterodoxas discutidas en el último capítulo, es probable que, incluso si la teoría de cuerdas es correcta, nadie las vea. Las cuerdas son tan pequeñas que una observación directa sería equivalente a leer el texto de esta página a 100 años luz de distancia; requeriría un poder de resolución casi un trillón de veces más fino que lo que permite nuestra tecnología actual. Algunos científicos argumentan locuazmente que una teoría tan alejada de la comprobación empírica directa yace en el dominio de la filosofía o la teología, pero no en el de la física.

* Podría señalar que los defensores de otra aproximación para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica, la *gravedad cuántica de lazo,* que se discutirá brevemente en el capítulo 16, adoptan un punto de vista que está más próximo a la primera conjetura —que el espaciotiempo tiene una estructura discreta en la menor de las escalas.

Yo encuentro esta visión miope o, como mínimo, prematura. Aunque quizá nunca tengamos una tecnología capaz de ver las cuerdas directamente, la historia de la ciencia está repleta de teorías que fueron puestas a prueba experimentalmente con medios indirectos.[12.13] La teoría de cuerdas no es modesta. Sus objetivos y promesas son grandes. Y esto es excitante y útil, porque si una teoría va a

ser la teoría de nuestro universo, debe ajustarse al mundo real no sólo en el esbozo a grandes rasgos discutido hasta ahora sino también en los más mínimos detalles. Como discutiremos ahora, en ellos se basan los test potenciales.

Durante las décadas de 1960 y 1970 los físicos de partículas dieron grandes pasos para entender la estructura cuántica de la materia y de las fuerzas no gravitatorias que rigen su comportamiento. El marco al que fueron llevados finalmente por los resultados experimentales y las ideas teóricas se denomina el *modelo estándar* de la física de partículas y se basa en la mecánica cuántica, las partículas de materia de la tabla 12.1 y las partículas de fuerza de la tabla 12.2 (ignorando el gravitón, puesto que el modelo estándar no incorpora la gravedad, e incluyendo la partícula de Higgs, que no figura en las tablas), todas ellas vistas como partículas puntuales. El modelo estándar es capaz de explicar esencialmente todos los datos producidos por los aceleradores de átomos en el mundo, y durante años sus inventores han sido laureados merecidamente con los más altos honores. Incluso así, el modelo estándar tiene limitaciones importantes. Ya hemos discutido cómo este modelo, y cualquier otra aproximación anterior a la teoría de cuerdas, fracasaba en el intento de fusionar la gravedad y la mecánica cuántica. Pero también tiene otros defectos.

El modelo estándar dejaba sin explicar por qué las fuerzas son transmitidas por la lista precisa de partículas de la tabla 12.2 y por qué la materia está compuesta de la lista precisa de partículas de la tabla 12.1. ¿Por qué hay tres familias de partículas de materia y por qué cada familia tiene las partículas que tiene? ¿Por qué no dos familias o simplemente una? ¿Por qué el electrón tiene tres veces la carga eléctrica del quark-down? ¿Por qué el muón pesa 23,4 veces más que el quark-up, y por qué el quark-up pesa una 350.000 veces más que un electrón? ¿Por qué está

construido el universo con este abanico de números aparentemente aleatorios? El modelo estándar toma las partículas en las tablas 12.1 y 12.2 (de nuevo, ignorando el gravitón) como input, y luego hace predicciones impresionantemente exactas de cómo interaccionarán y se influirán mutuamente las partículas. Pero el modelo estándar no puede explicar el input —las partículas y sus propiedades— igual que su calculadora no puede explicar los números que usted introdujo la última vez que la utilizó.

Preguntarse sobre las propiedades de estas partículas no es una pregunta académica de por qué este o ese detalle esotérico resulta ser de una forma u otra. Durante el último siglo los científicos se han dado cuenta de que el universo tiene las características familiares por la experiencia común solamente porque las partículas de las tablas 12.1 y 12.2 tienen precisamente las propiedades que tienen. Incluso cambios menores en las masas o las cargas eléctricas de algunas de las partículas las harían, por ejemplo, incapaces de participar en los procesos nucleares que alimentan las estrellas. Y sin estrellas, el universo sería un lugar completamente diferente. Así, las característcas detalladas de las partículas elementales están entretejidas con lo que muchos ven como la cuestión más profunda en toda la ciencia: *¿por qué las partículas elementales tienen las propiedades correctas para permitir que ocurran procesos nucleares, que se enciendan las estrellas, que se formen planetas alrededor de las estrellas, y que al menos en uno de estos planetas exista vida ?*

El modelo estándar no puede ofrecer ninguna intuición sobre esta cuestión porque las propiedades de las partículas son parte de su input necesario. La teoría no empieza a producir resultados hasta que no se especifiquen las propiedades de las partículas. Pero la teoría de cuerdas es diferente. En la teoría de cuerdas las propiedades de las

partículas están determinadas por las pautas vibracionales de las cuerdas y por eso la teoría mantiene la promesa de proporcionar una explicación.

Propiedades de partículas en la teoría de cuerdas

Para entender el nuevo marco explicatorio de la teoría de cuerdas necesitamos tener una idea mejor de cómo resultan las propiedades de las partículas a partir de las vibraciones de las cuerdas, así que consideremos las propiedad más simple de una partícula, su masa.

A partir de $E = me^2$ sabemos que masa y energía son intercambiables; como dólares y euros, son monedas convertibles (pero a diferencia de las divisas monetarias, tienen un tipo de cambio fijo, dado por la velocidad de la luz multiplicada por sí misma, c^2). Nuestra supervivencia depende de la ecuación de Einstein, puesto que el calor y la luz del Sol que sostienen la vida están generados por la conversión de 4,3 millones de toneladas de materia en energía cada segundo; un día, las reacciones nucleares en la Tierra quizá emulen al Sol aprovechando con seguridad la ecuación de Einstein para proporcionar a la Humanidad un suministro de energía esencialmente ilimitado.

En estos ejemplos, la energía es producida a partir de la masa. Pero la ecuación de Einstein funciona perfectamente a la inversa —en la dirección en la que la masa se produce a partir de la energía— y ésa es la dirección en la que la teoría de cuerdas utiliza la ecuación de Einstein. La *masa* de una partícula en la teoría de cuerdas no es otra cosa que la energía de su cuerda vibrante. Por ejemplo, la explicación que ofrece la teoría de cuerdas de por qué una partícula es más pesada que otra es que la cuerda que constituye la partícula más pesada está vibrando más rápida y más

furiosamente que la cuerda que constituye la partícula más ligera. Una vibración más rápida y más furiosa significa energía más alta, y energía más alta se traduce, vía la ecuación de Einstein, en masa mayor. Recíprocamente, cuanto más ligera es una partícula, más lenta y menos frenética es la correspondiente vibración de la cuerda; una partícula sin masa como un fotón o un gravitón corresponde a una cuerda que ejecuta la pauta vibracional más plácida y suave que puede ejecutar. [*34] ’[12.14]

Otras propiedades de una partícula, tales como su carga eléctrica y su espín, están codificadas mediante características más sutiles de las vibraciones de la cuerda. Comparadas con la masa, estas características son más difíciles de describir de forma no matemática, pero siguen la misma idea básica: la pauta vibracional es la huella dactilar de la partícula; todas las propiedades que utilizamos para distinguir una partícula de otra están determinadas por la pauta vibracional de la cuerda de la partícula.

A principios de la década de 1970, cuando los físicos analizaron las pautas vibracionales que aparecen en la primera encarnación de la teoría de cuerdas —la *teoría de cuerdas bosónica*— para determinar los tipos de propiedades de las partículas que predecía la teoría, encontraron una pega. Cada pauta vibracional en la teoría de cuerdas bosónica tenía una cantidad de espín entera: espín 0, espín 1, espín 2 y así sucesivamente. Esto era un problema, porque aunque las partículas mensajeras tienen valores de espín de este tipo, las partículas de materia (como electrones y quarks) no lo tienen. Estas últimas tienen una cantidad de espín fraccionaria, espín ½. En 1971, Pierre Ramond de la Universidad de Florida se propuso remediar esta deficiencia; pronto encontró una manera de modificar las ecuaciones de la teoría de cuerdas bosónica para permitir también pautas vibracionales semienteras.

De hecho, en un examen más detallado, la investigación de Ramond, junto con resultados encontrados por Schwarz y su colaborador André Neveu e ideas posteriores de Ferdinando Gliozzi, Joél Scherk y David Olice, reveló un perfecto equilibrio —una nueva simetría— entre las pautas vibracionales con diferentes espines en la teoría de cuerdas modificada. Estos investigadores encontraron que las nuevas pautas vibracionales aparecían en pares cuyos valores de espín diferían en media unidad. Por cada pauta vibracional con espín ½ había una pauta vibracional asociada con espín 0. Por cada pauta vibracional de espín 1, había una pauta vibracional asociada de espín ½, y así sucesivamente. La relación entre valores de espín entero y semientero fue llamada *supersimetría,* y con estos resultados nació la *teoría de cuerdas supersimétrica,* o *teoría de supercuerdas.* Casi una década más tarde, cuando Schwarz y Green demostraron que todas las anomalías potenciales que amenazaban la teoría de cuerdas se cancelaban mutuamente, ellos estaban trabajando realmente en el marco de la teoría de supercuerdas, y así la revolución que inició su artículo de 1984 es llamada como más propiedad la primera revolución de las *supercuerdas.* (En lo que sigue, me referiré a menudo a cuerdas y a teoría de cuerdas, pero eso es tan sólo una abreviatura; siempre entendemos supercuerdas y teoría de supercuerdas.)

Con esta base podemos afirmar ahora qué significa que la teoría de cuerdas vaya más allá de las características a grandes rasgos y explique el universo en detalle. Se reduce a esto: entre las pautas vibracionales que pueden ejecutar las cuerdas, debe haber pautas cuyas propiedades coinciden con las de los tipos de partículas conocidas. La teoría tiene pautas vibracionales con espín */2, pero debe tener pautas vibracionales de espín */2 que se ajusten *precisamente* a las partículas de materia conocidas,

resumidas en la tabla 12.1. La teoría tiene pautas vibracionales de espín 1, pero debe tener pautas vibracionales de espín 1 que se ajusten *precisamente* a las partículas mensajeras conocidas, resumidas en la tabla 12.2. Finalmente, si los experimentos descubren partículas de espín 0, tales como se predicen para los campos de Higgs, la teoría de cuerdas debe dar pautas vibracionales que se ajusten *precisamente* a las propiedades de estas partículas. En resumen, para que la teoría de cuerdas sea viable, sus pautas vibracionales deben dar y explicar las partículas del modelo estándar.

Ésta es, entonces, la gran oportunidad de la teoría de cuerdas. Si la teoría de cuerdas es correcta, *hay* una explicación para las propiedades de las partículas que han medido los experimentadores, y se encuentra en las pautas vibracionales resonantes que pueden ejecutar las cuerdas. Si las propiedades de estas pautas vibracionales se ajustan a las propiedades de la partículas de las tablas 12. y 12.2, creo que eso convencería incluso a los escépticos más recalcitrantes de la veracidad de la teoría de cuerdas, ya se haya visto o no directamente la estructura ampliada de una cuerda. Y además de establecerse como la largo tiempo buscada teoría unificada, con dicho encaje entre teoría y datos experimentales, la teoría de cuerdas ofrecería la primera explicación fundamental de por qué el universo es como es.

De modo que ¿cómo afronta la teoría de cuerdas este test crítico?

Demasiadas vibraciones

Bien, a primera vista, la teoría de cuerdas falla. De entrada, hay un número infinito de diferentes pautas vibracionales

de cuerdas, y las primeras de una serie inacabable se ilustran esquemáticamente en la figura 12.4. Pero las tablas 12.1 y 12.2 contienen sólo una lista de partículas finita, y por eso desde el principio parece que tenemos un enorme desajuste entre la teoría de cuerdas y el mundo real. Y lo que es más, cuando analizamos matemáticamente las energías posibles —y con ello las masas— de estas pautas vibracionales, tropezamos con otro importante desajuste entre teoría y observación. Las masas de las pautas vibracionales de cuerdas permisibles no guardan ningún parecido con las masas de las partículas medidas experimentalmente que se recogen en las tablas 12.1 y 12.2. No es difícil ver por qué.

Desde los primeros días de la teoría de cuerdas los investigadores han advertido que la rigidez de una cuerda es inversamente proporcional a su longitud (a su longitud al cuadrado, para ser más precisos): mientras que las cuerdas largas son fáciles de doblar, cuanto más corta es la cuerda más rígida se hace. En 1974, cuando Schwarz y Scherk propusieron reducir el tamaño de las cuerdas de modo que incorporaran una fuerza gravitatoria de la intensidad correcta, también propusieron por la misma razón aumentar la tensión de las cuerdas —hasta, como es el caso, mil trillones de trillones(10^{39}) de toneladas, unas 1.00000000000000000000000000000000000000000 (10^{41}) veces la tensión de una cuerda de piano media—. Ahora, si imagina que está doblando una cuerda minúscula y extraordinariamente rígida para dar una de las cada vez más complicadas pautas de la figura 12.4, usted se dará cuenta de que cuanta más crestas y vientres hay, más energía tendrá que ejercer. Recíprocamente, una vez que una cuerda está vibrando en una pauta tan complicada, incorpora una enorme cantidad de energía. Así pues, todas las pautas vibracionales de cuerdas salvo las más simples

son altamente energéticas, y con ello corresponden, vía $E = me^2$, a partículas con masas enormes.

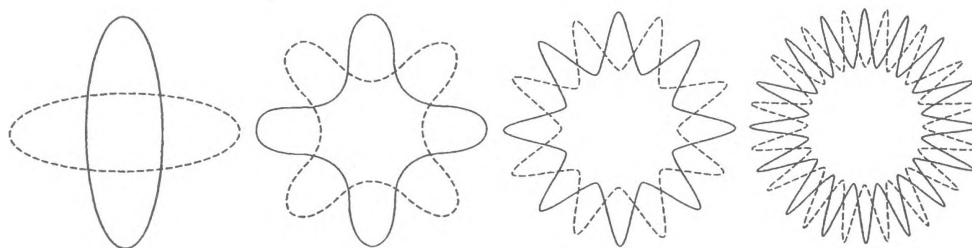


FIGURA 12.4. Los primeros ejemplos de pautas vibracionales de cuerdas.

Y por enorme quiero decir realmente enorme. Los cálculos muestran que las masas de las vibraciones de cuerdas siguen una serie análoga a la de los armónicos musicales: todas son múltiplos de una masa fundamental, la *masa de Planck,* igual que los sobretonos son todos múltiplos de una frecuencia o tono fundamental. Para los patrones de la física de partículas, la masa de Planck es colosal —es unos diez trillones (10^{19}) de veces la masa de un protón, aproximadamente la masa de una mota de polvo o de una bacteria—. Así, las masas posibles de las vibraciones de cuerdas son 0 veces la masa de Planck, 1 vez la masa de Planck, 2 veces la masa de Planck, 3 veces la masa de Planck, y así sucesivamente, lo que muestra que las masas de todas las vibraciones de cuerdas salvo la masa 0 son gigantescas.[12.15]

Como puede ver, algunas de las partículas en las tablas 12.1 y 12.2 carecen realmente de masa, pero la mayoría la tienen. Y las masas no nulas en las tablas están más lejos de la masa de Planck de lo que está el sultán de Brunei de necesitar un préstamo. Así pues, vemos claramente que las masas de las partículas conocidas no encajan en la pauta

adelantada por la teoría de cuerdas. ¿Significa esto que la teoría de cuerdas está descartada? Usted podría pensarlo, pero no es así. Tener una lista inacabable de pautas vibracionales cuyas masas se alejan cada vez más de las de las partículas conocidas es un reto que la teoría debe superar. Años de investigación han revelado estrategias prometedoras para hacerlo.

De entrada, note que experimentos con los tipos de partículas conocidas nos han enseñado que las partículas pesadas tienden a ser inestables; típicamente, las partículas pesadas se desintegran rápidamente en un chaparrón de partículas de masas menores generando en última instancia los tipos más ligeros y más familiares de las tablas 12.1 y 12.2. (Por ejemplo, el quark top se desintegra en aproximadamente 10“^{24} segundos.) Esperamos que esta lección siga siendo válida para las pautas vibracionales de las cuerdas «superpesadas», y eso explicaría por qué, incluso si fueron producidas copiosamente en el universo primitivo y caliente, pocas de ellas, si es que lo ha hecho alguna, han sobrevivido hasta hoy. Incluso si la teoría de cuerdas es correcta, nuestra única oportunidad de ver las pautas vibracionales superpesadas sería producirlas mediante colisiones de alta energía en los aceleradores de partículas. Sin embargo, puesto que los aceleradores actuales sólo pueden alcanzar energías equivalentes a aproximadamente 1.000 veces la masa de un protón, son demasiado débiles para excitar otras que no sean las pautas vibracionales más plácidas de la teoría de cuerdas. Así, la predicción de la teoría de cuerdas de una torre de partículas con masas que empiezan por ser mil billones de veces mayores que las alcanzables con la tecnología actual no está en conflicto con la observación.

Esta explicación también aclara que el contacto entre la teoría de cuerdas y la física de partículas implicará

solamente las vibraciones de cuerdas de energía más baja —las carentes de masa— puesto que las otras están más allá de lo que podemos alcanzar con la tecnología actual. Pero ¿qué hay del hecho de que la mayoría de las partículas de las tablas 12.1 y 12.2 sí tienen masa?

Es una cuestión importante, pero menos perturbadora de lo que podría parecer al principio. Puesto que la masa de Planck es enorme, e incluso la partícula más masiva conocida, el quark top, pesa sólo 0,0000000000000000116 (aproximadamente 10“^{17}) veces la masa de Planck. En cuanto al electrón, pesa 0,0000000000000000000000034 (aproximadamente 10"^{23}) veces la masa de Planck. De modo que, en primera aproximación *—válida hasta una parte en* 10^{17}— todas las partículas en las tablas 12.1 y 12.2 tienen masas iguales a cero veces la masa de Planck (de la misma manera que la mayoría de las fortunas de la Tierra son, en primera aproximación, 0 veces la del sultán de Brunei), precisamente como «predecía» la teoría de cuerdas. Nuestro objetivo es mejorar esta aproximación y demostrar que la teoría de cuerdas explica las minúsculas desviaciones de 0 veces la masa de Planck características de las partículas en las tablas 12.1 y 12.2. Pero las pautas vibracionales sin masa no están tan en contra de los datos como usted podría haber pensado inicialmente.

Esto es alentador, pero un examen detallado revela aún más desafíos. Utilizando las ecuaciones de la teoría de supercuerdas los físicos han hecho una lista de todas las pautas vibracionales de cuerdas sin masa. Una entrada es el gravitón de espín 2, y ése es el gran éxito que lanzó la teoría; garantiza que la gravedad es parte de la teoría de cuerdas cuántica. Pero los cálculos muestran también que hay muchas más pautas vibracionales de espín 1 sin masa que partículas en la tabla 12.2, y hay muchas más pautas vibracionales de espín */$_2$ sin masa que partículas en la

tabla 12.1. Además, la lista de pautas vibracionales de espín '/$_2$ no muestra ninguna traza de agolpamientos repetitivos como la estructura en familias de la tabla 12.1. De modo que con un examen menos superficial parece cada vez más difícil ver cómo las vibraciones de cuerdas se adaptarían a los tipos de partículas conocidas.

Así, a mediados de la década de 1980, aunque había razones para excitarse por la teoría de supercuerdas, también había razones para ser escéptico. Es innegable que la teoría de supercuerdas presentaba un paso capital hacia la unificación-. Al proporcionar la primera aproximación consistente para fusionar gravedad y mecánica cuántica, hacía para la física lo que Roger Bannister hizo para la milla en cuatro minutos: demostró que lo aparentemente imposible es posible. La teoría de supercuerdas estableció definitivamente que podíamos atravesar la barrera aparentemente impenetrable que separa los dos pilares de la física del siglo xx.

Pese a todo, al tratar de ir más lejos y demostrar que la teoría de supercuerdas podía explicar las características detalladas de la materia y las fuerzas de la Naturaleza, los físicos encontraron dificultades. Esto llevó a los escépticos a proclamar que la teoría de supercuerdas, a pesar de todo su potencial para la unificación, era meramente una estructura matemática sin relevancia directa para el universo físico.

Con ser importantes estos problemas recién discutidos, en el primer lugar de la lista de defectos de la teoría de supercuerdas para los escépticos había una característica que aún tengo que introducir. La teoría de supercuerdas proporciona realmente una fusión acertada de la gravedad y la mecánica cuántica, una fusión que está libre de las inconsistencias matemáticas que plagaban todos los intentos anteriores. Sin embargo, por extraño que pueda sonar, a los pocos años de su descubrimiento los físicos

encontraron que las ecuaciones de la teoría de supercuerdas *no* tienen estas propiedades deseables si el universo tiene tres dimensiones espaciales. En lugar de ello, las ecuaciones de la teoría de supercuerdas son matemáticamente consistentes sólo si el universo tiene nueve dimensiones espaciales o, incluyendo la dimensión temporal, ¡funcionan sólo en un universo con diez dimensiones espaciotemporales!

En comparación con esta extrañísima afirmación, la dificultad de establecer una correspondencia detallada entre pautas vibracionales de cuerdas y tipos de partículas conocidas parece una cuestión secundaria. La teoría de supercuerdas requiere la existencia de seis dimensiones del espacio que nadie ha visto todavía. Eso no es un punto menor —*eso* es un problema.

¿O no lo es?

Descubrimientos teóricos hechos durante las primeras décadas del siglo xx, mucho antes de que la teoría de cuerdas entrara en escena, sugerían que las dimensiones extras no tenían por qué ser un problema. Y con la actualización de finales del siglo xx, los físicos demostraron que estas dimensiones extras tienen la capacidad de salvar el hueco entre las pautas vibracionales de la teoría de cuerdas y las partículas elementales que los experimentadores han descubierto.

Éste es uno de los desarrollos más gratificantes de la teoría; veamos cómo funciona.

Unificación en dimensiones más altas

En 1919 Einstein recibió un artículo que fácilmente podía haber sido despachado como desvarios de un loco. Estaba escrito por un matemático alemán poco conocido llamado Theodor Kaluza, y en unas pocas páginas exponía una aproximación para unificar las dos fuerzas conocidas en la época, la gravedad y el electromagnetismo. Para conseguir

este objetivo, Kaluza proponía una separación radical de algo tan básico, tan completamente tomado como dado, que parecía fuera de dudas. Proponía que el universo no tiene tres dimensiones espaciales. En su lugar, Kaluza pedía a Einstein y al resto de la comunidad de la física que contemplara la posibilidad de que el universo tenga *cuatro* dimensiones espaciales, de modo que, junto con el tiempo, tiene un total de cinco dimensiones espaciotemporales.

Para empezar, ¿qué demonios significa eso? Bien, cuando decimos que hay tres dimensiones espaciales queremos decir que hay tres direcciones o ejes independientes a lo largo de los cuales podemos movemos. Desde su posición actual usted puede definirlas como izquierda/derecha, delante/detrás y arriba/abajo; en un universo con tres dimensiones espaciales, cualquier movimiento que emprenda es una combinación de movimientos a lo largo de estas tres direcciones. Una forma equivalente de expresarlo es que en un universo con tres dimensiones espaciales usted necesita exactamente tres elementos de información para especificar una posición. En una ciudad, por ejemplo, usted necesita dar la calle de un edificio, una calle transversal que fija la manzana y un número de planta para especificar dónde va a dar una fiesta. Y si usted quiere que la gente se presente con la comida aún caliente, también necesita especificar un cuarto dato: un tiempo. Eso es lo que entendemos cuando decimos que el espaciotiempo es tetradimensional.

Kaluza propuso que además de izquierda/derecha, delante/detrás y arriba/abajo, *el universo tiene en realidad una dimensión espacial más que, por alguna razón, nadie ha visto aún.* Si es correcto, esto significaría que hay otra dirección independiente en la que pueden moverse los objetos y, por lo tanto, que necesitamos dar cuatro elementos de información para especificar un lugar exacto

en el espacio, y un total de cinco elementos de información si especificamos también un tiempo.

Muy bien; eso es lo que proponía el artículo que Einstein recibió en abril de 1919. La pregunta es: ¿por qué Einstein no lo tiró? Nosotros no vemos otra dimensión espacial —nunca nos encontramos caminando sin rumbo porque una calle, otra calle transversal y un número de planta sean insuficientes para especificar una dirección— de modo que ¿por qué contemplar una idea tan extraña? Bien, he aquí por qué. Kaluza comprendió que las ecuaciones de la teoría de la relatividad general de Einstein podían extenderse fácilmente de forma matemática a un universo que tuviera una dimensión espacial más. Kaluza realizó esta extensión y encontró, de forma bastante natural, que la versión de la relatividad general en dimensiones más altas no sólo incluía las ecuaciones de la gravedad originales de Einstein sino que, debido a la dimensión espacial extra, también tenía ecuaciones extras. Cuando Kaluza estudió estas ecuaciones extras, descubrió algo extraordinario: las ecuaciones extras no eran otras que las ecuaciones que Maxwell había descubierto en el siglo xix para describir el campo electromagnético. Al imaginar un universo con una nueva dimensión espacial, Kaluza había propuesto una solución a lo que Einstein veía como uno de los problemas más importantes de toda la física. *Kaluza había encontrado un marco que combinaba las ecuaciones originales de Einstein de la relatividad general con las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo.* Por eso es por lo que Einstein no tiró el artículo de Kaluza.

Intuitivamente, usted puede considerar así la propuesta de Kaluza. En relatividad general, Einstein despertaba al espacio y el tiempo. Cuando éstos se flexionaban y estiraban, Einstein se dio cuenta de que había encontrado la encarnación geométrica de la fuerza gravitatoria. El artículo

de Kaluza sugería que el alcance geométrico del espacio y el tiempo era aún mayor. Mientras que Einstein se dio cuenta de que los campos gravitatorios pueden describirse como deformaciones y rizos en las tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal habituales, Kaluza comprendió que en un universo con una dimensión espacial adicional habría deformaciones y rizos adicionales. Y estas deformaciones y rizos, demostraba su análisis, serían las precisas para describir los campos electromagnéticos. En manos de Kaluza, la aproximación geométrica del propio Einstein al universo se mostró suficientemente poderosa para unir gravedad y electromagnetismo.

Por supuesto, seguía habiendo un problema. Aunque las matemáticas funcionaban, no había evidencia —y sigue sin haberla— de ninguna dimensión espacial además de las tres que todos conocemos. Así que el descubrimiento de Kaluza ¿era una mera curiosidad, o era algo relevante para nuestro universo? Kaluza tenía gran confianza en la teoría —por ejemplo, él aprendió a nadar estudiando un tratado de natación y arrojándose luego al mar— pero la idea de una dimensión espacial invisible, por muy atractiva que fuera la teoría, aún sonaba escandalosa. Entonces, en 1926, el físico sueco Oscar Klein dio un nuevo giro a la idea de Kaluza, uno que sugería dónde podría estar oculta la dimensión extra.

Las dimensiones ocultas

Para entender la idea de Klein, imaginemos a Philippe Petit[*35] caminando por una cuerda tendida entre el monte Everest y Lhotse. Vista a una distancia de muchos kilómetros, como en la figura 12.5, la cuerda parece ser un objeto unidimensional como una línea —un objeto que sólo tiene extensión a lo largo de su longitud—. Si nos dijeran

que un gusano minúsculo estaba deslizándose por la cuerda por delante de Philippe, le animaríamos a gritos porque tendría que ir siempre por delante de los pasos de Philippe para evitar el desastre. Por supuesto, tras un momento de reflexión todos nos damos cuenta de que hay más en la superficie de la cuerda que la dimensión izquierda/derecha que podemos percibir directamente. Aunque difícil de ver a simple vista desde una gran distancia, la superficie de la cuerda tiene una segunda dimensión: la dimensión a favor/en contra de las agujas del reloj que está «enrollada» a su alrededor. Con la ayuda de un telescopio modesto, esta dimensión circular se hace visible y vemos que el gusano puede moverse no sólo a lo largo de la dirección izquierda/derecha, sino también en la corta dirección «enrollada» a favor/en contra de las agujas del reloj. Es decir, en cada punto de la cuerda el gusano puede moverse en dos direcciones independientes (eso es lo que queremos decir cuando decimos que la superficie de la cuerda es bidimensional,[*36] de modo que puede ponerse a salvo del pisotón de Philippe o bien deslizándose por delante de él, como imaginábamos inicialmente, o arrestándose alrededor de la minúscula dimensión circular y dejando que Philippe pase por encima.

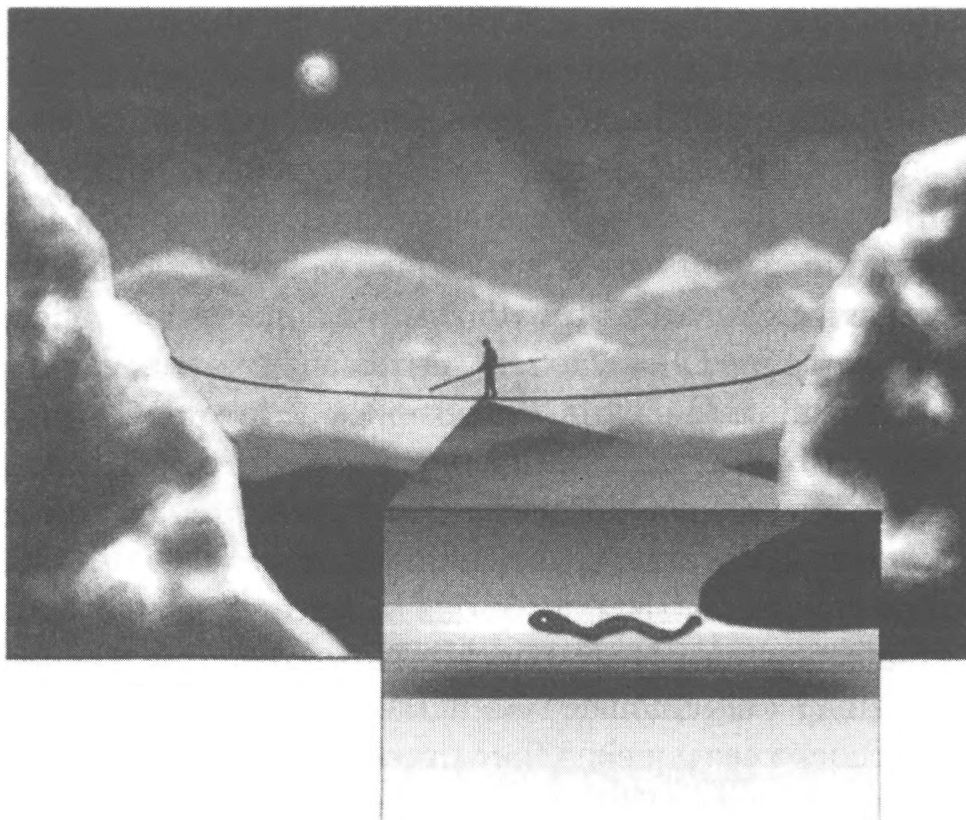


FIGURA 12.5. A distancia, un cable parece unidimensional, aunque con un telescopio suficientemente potente se hace visible su segunda dimensión enrollada.

La cuerda ilustra que las dimensiones —las direcciones independientes en las que algo puede moverse— vienen en dos variedades cualitativamente distintas. Pueden ser grandes y fáciles de ver, como la dimensión izquierda/derecha de la superficie de la cuerda, o pueden ser minúsculas y más difíciles de ver, como la dirección a favor/en contra de las agujas del reloj que circula alrededor de la superficie de la cuerda. En este ejemplo, no era un reto importante ver el pequeño tamaño circular de la superficie de la cuerda. Todo lo que necesitábamos era un instrumento que diera un aumento razonable. Pero como

usted puede imaginar, cuanto más pequeña es una dimensión enrollada, más difícil es detectarla. A una distancia de algunos kilómetros una cosa es revelar la dimensión circular de la superficie de una cuerda, pero sería otra completamente diferente revelar la dimensión circular de algo tan fino como un hilo dental o una estrecha fibra nerviosa.

La contribución de Klein consistió en sugerir que lo que es cierto para un objeto dentro del universo podría ser cierto para el tejido del propio universo. A saber, de la misma forma que la superficie de una cuerda tiene dimensiones grandes y pequeñas, también las tiene el tejido del espacio. Quizá las tres dimensiones que todos conocemos —izquierda/derecha, delante/detrás y arriba/abajo— son, como la extensión horizontal de la cuerda, dimensiones de la variedad grande y fácil de ver. Pero de la misma forma que la superficie de la cuerda tiene una dimensión adicional, pequeña, enrollada y circular, quizá el tejido del espacio tiene también una dimensión pequeña, enrollada y circular, una dimensión tan pequeña que nadie tiene un aparato amplificador suficientemente potente para revelar su existencia. Debido a su minúsculo tamaño, argumentaba Klein, la dimensión estaría oculta.

¿Cuán pequeña es pequeña? Bien, incorporando ciertas características de la mecánica cuántica en la propuesta original de Kaluza, el análisis matemático de Klein revelaba que el radio de una dimensión espacial circular extra sería aproximadamente la longitud de Planck,[12.16] ciertamente demasiado pequeña para ser accesible experimentalmente (los aparatos actuales no pueden resolver nada más pequeño que aproximadamente una milésima del tamaño de un núcleo atómico, lo que queda muy lejos de la longitud de Planck en un factor de mil billones). Pese a todo, para un imaginario gusano del tamaño de Planck, esta dimensión

minúscula, enrollada y circular ofrecería una nueva dirección en la que podría deambular tan libremente como un gusano ordinario recorre la dimensión circular de la cuerda en la figura 12.5. Por supuesto, de la misma forma que un gusano ordinario encuentra que no hay mucho lugar para explorar en la dirección de las agujas del reloj antes de que se encuentre de nuevo en su punto de partida, un gusano de tamaño de Planck que se arrastra a lo largo de una dimensión del espacio enrollada también volvería repetidamente a su punto de partida. Pero aparte de la longitud del viaje que permitiera, una dimensión enrollada proporcionaría una dirección en la que el gusano minúsculo podría moverse con tanta facilidad como lo hace en las tres dimensiones desplegadas familiares.

Para hacerse una idea intuitiva de cómo es esto, note que lo que hemos estado citando como la dimensión enrollada de una cuerda —la dirección a favor/en contra de las agujas del reloj— existe en cada punto a lo largo de su dimensión extendida. El gusano puede arrastrarse alrededor de la cuerda en cualquier punto a lo largo de su longitud estirada, y por eso la superficie de la cuerda puede describirse como algo que tiene una dimensión larga con una dirección minúscula y circular cosida en cada punto, como la figura 12.6. Ésta es una imagen útil para tener en mente porque también se aplica a la propuesta de Klein para ocultar la dimensión del espacio extra de Kaluza.

Para verlo, examinemos de nuevo el tejido del espacio mostrando secuencialmente su estructura en escalas de distancia cada vez más pequeñas, como en la figura 12.7. En los primeros niveles de aumento, nada nuevo se revela: el tejido del espacio sigue pareciendo tridimensional (lo que, como es habitual, representamos esquemáticamente en la página impresa por una malla bidimensional). Sin embargo, cuando descendemos a la escala de Planck, el máximo nivel

de ampliación en la figura, Klein sugería que una nueva dimensión enrollada se hacía visible. De la misma forma que la dimensión circular de la cuerda existe en cada punto a lo largo de su dimensión grande y extendida, la dimensión circular en esta propuesta existe en cada punto de las tres dimensiones familiares extendidas de la vida diaria. En la figura 12.7 ilustramos esto dibujando la dimensión circular adicional en varios puntos a lo largo de las dimensiones extendidas (puesto que dibujar el círculo en cada punto oscurecería la imagen) y usted puede ver inmediatamente la similitud con la cuerda de la figura 12.6. Por lo tanto, en la propuesta de Klein el espacio debería concebirse como algo que tiene tres dimensiones desplegadas (de las que sólo mostramos dos en la figura) con una dimensión circular adicional cosida en cada punto. Note que la dimensión extra no es un bache o un lazo dentro de las tres dimensiones espaciales habituales, como podrían llevarle a pensar las limitaciones gráficas de la figura. En su lugar, la dimensión extra es una nueva dirección, completamente distinta de las tres que conocemos, que existe en cada punto en nuestro espacio tridimensional ordinario, pero es tan pequeña que escapa a la detección incluso con nuestros instrumentos más sofisticados.



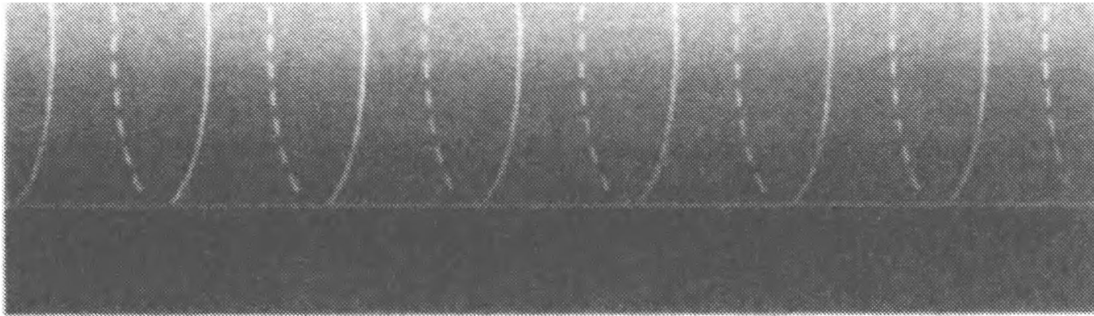


FIGURA 12.6. La superficie de una cuerda tiene una dimensión larga con una dimensión circular cosida en cada punto.

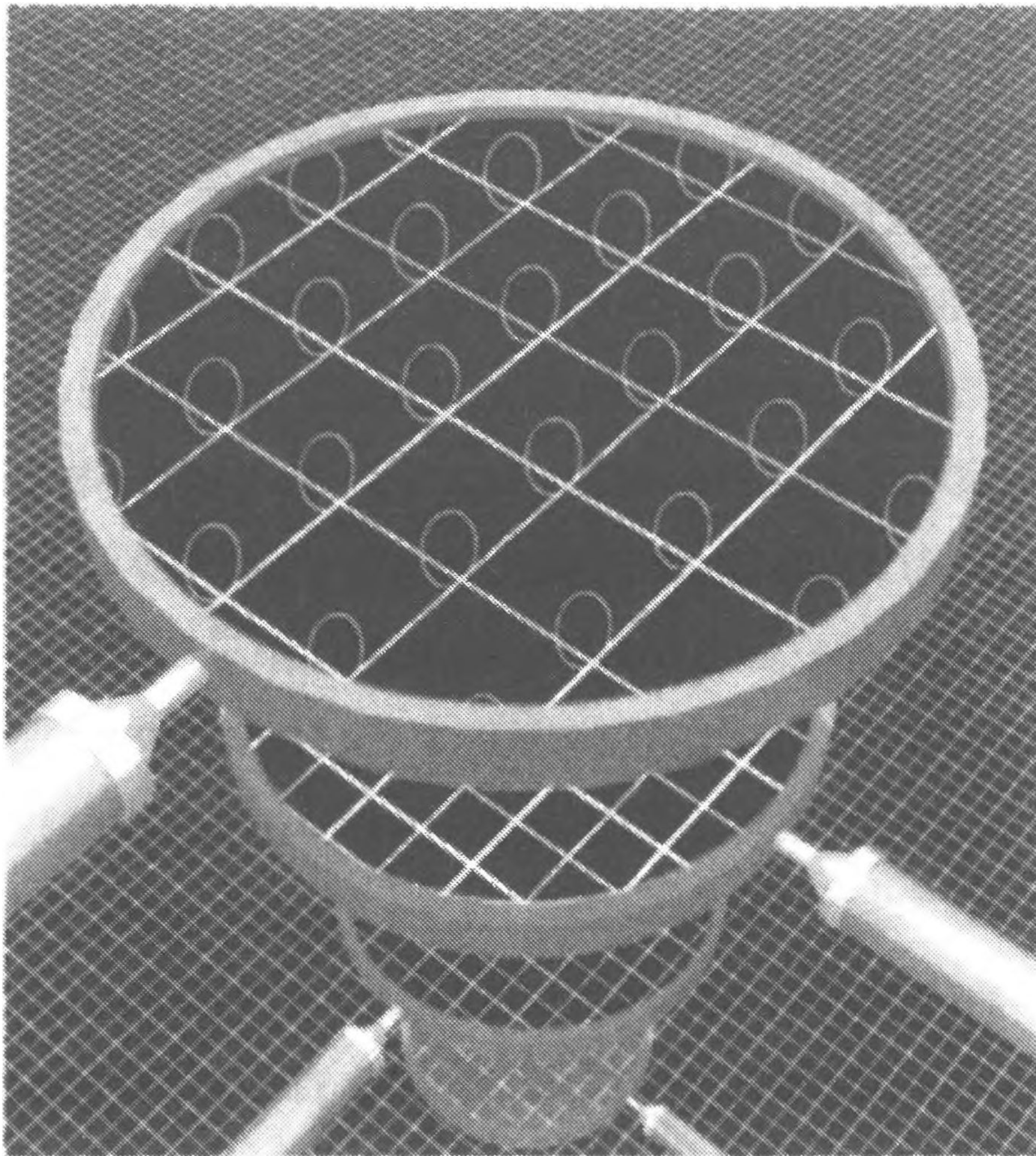


FIGURA 12.7. La propuesta de Kaluza-Klein consiste en que en escalas muy pequeñas el espacio tiene una dimensión circular extra cosida en cada punto familiar.

Con esta modificación de la idea original de Kaluza, Klein ofrecía una respuesta a la pregunta de cómo podría tener el universo más de las tres dimensiones espaciales de la

experiencia común y quedar ocultas, un marco que desde entonces se ha conocido como *teoría de Kaluza-Klein-,* y puesto que una dimensión espacial extra era todo lo que Kaluza necesitaba para fusionar la relatividad general y el electromagnetismo, la teoría de Kaluza-Klein parecería ser lo que Einstein estaba buscando. De hecho, Einstein y muchos otros se emocionaron con la posibilidad de una unificación a través de una nueva dimensión espacial oculta, y se puso en marcha un gran esfuerzo para ver si esta unificación funcionaría en todos los detalles. Pero no pasó mucho tiempo antes de que la teoría de Kaluza-Klein tropezara con sus propios problemas. Quizá el más manifiesto era que todos los intentos por incorporar el electrón en la representación extradimensional se mostraron intratables.[12.17] Einstein siguió haciendo incursiones en el marco de Kaluza-Klein hasta finales de la década de 1940, pero la promesa inicial de la aproximación no pudo materializarse, y el interés desapareció poco a poco.

En pocas décadas, sin embargo, la teoría de Kaluza-Klein haría una reaparición espectacular.

La teoría de cuerdas y las dimensiones ocultas

Además de las dificultades que encontró la teoría de Kaluza-Klein al tratar de describir el micromundo, había otra razón por la que los científicos se mostraban indecisos ante esta aproximación. Muchos encontraban arbitrario y extravagante postular una dimensión espacial oculta. Kaluza no había llegado a la idea de una nueva dimensión espacial a través de una cadena rígida de razonamiento deductivo. Más bien, él se sacó la idea del sombrero y al analizar sus implicaciones descubrió un vínculo inesperado

entre la relatividad general y el electromagnetismo. Así, aunque era un gran descubrimiento por sí mismo, carecía del sentido de inevitabilidad. Si usted preguntara a Kaluza y a Klein por qué el universo tenía cinco dimensiones espaciales en lugar de cuatro, o seis, o siete, o siete mil para el caso, ellos no hubieran tenido una respuesta mucho más convincente que «¿por qué no?».

Más de tres décadas después, la situación cambió radicalmente. La teoría de cuerdas es la primera aproximación para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica; además, tiene el potencial para unificar nuestra comprensión de todas las fuerzas y toda la materia. Pero las ecuaciones mecanocuánticas de la teoría de cuerdas no funcionan en cuatro dimensiones espaciotemporales, ni en cinco, seis, siete o siete mil. En su lugar, por razones discutidas en la próxima sección, las ecuaciones de la teoría de cuerdas funcionan solamente en diez dimensiones espaciotemporales —nueve de espacio más una de tiempo—. La teoría de cuerdas *exige* más dimensiones.

Éste es un resultado de un tipo fundamentalmente diferente, uno nunca antes encontrado en la historia de la física. Antes de las cuerdas, ninguna teoría decía nada sobre el número de dimensiones espaciales en el universo. Cada teoría desde Newton hasta Einstein, pasando por Maxwell, suponía que el universo tenía tres dimensiones espaciales, igual que todos nosotros suponemos que el Sol saldrá mañana. Kaluza y Klein presentaron un desafío sugiriendo que había cuatro dimensiones espaciales, pero esto equivalía a otra hipótesis —una hipótesis diferente, pero una hipótesis en cualquier caso—. Ahora, por primera vez, la teoría de cuerdas proporcionaba ecuaciones que *predecían* el número de dimensiones espaciales. Un cálculo —no una hipótesis, no una conjetura inspirada— determina

el número de dimensiones espaciales según la teoría de cuerdas, y lo sorprendente es que el número calculado no es tres, sino nueve. La teoría de cuerdas nos lleva, inevitablemente, a un universo con seis dimensiones espaciales extra y con ello proporciona un contexto convincente y listo para apelar a las ideas de Kaluza y Klein.

La propuesta original de Kaluza y Klein suponía sólo una dimensión oculta, pero es fácilmente generalizable a dos, tres, o incluso las seis dimensiones extras requeridas por la teoría de cuerdas. Por ejemplo, en la figura 12.8a reemplazamos la dimensión circular adicional de la figura 12.7, una forma unidimensional, por la superficie de una esfera, una forma bidimensional (recuerde de la discusión del capítulo 8 que la superficie de una esfera es bidimensional porque usted necesita dos elementos de información —como la latitud y la longitud en la superficie de la Tierra— para especificar una posición). Como sucede con el círculo, usted debería imaginar la esfera cosida en cada punto de las dimensiones habituales, incluso si en la figura 12.8a, para mantener la imagen nítida, dibujamos sólo aquellas que yacen en las intersecciones de las líneas de la malla. En un universo de este tipo, usted necesitaría un total de cinco elementos de información para ubicar una posición en el espacio: tres elementos para ubicar su posición en las dimensiones grandes (calle, calle transversal, número de planta) y dos elementos para ubicar su posición en la esfera (latitud, longitud) cosida en ese punto. Ciertamente, si el radio de la esfera fuera minúsculo —miles de millones de veces menor que un átomo— los dos últimos elementos de información no importarían mucho para seres relativamente grandes como nosotros. No obstante, la dimensión extra sería una parte integrante de la constitución ultramicroscópica del tejido espacial. Un gusano ultramicroscópico necesitaría los cinco elementos de

información y, si incluimos el tiempo, necesitaría seis elementos de información para llegar a la fiesta correcta en el momento correcto.

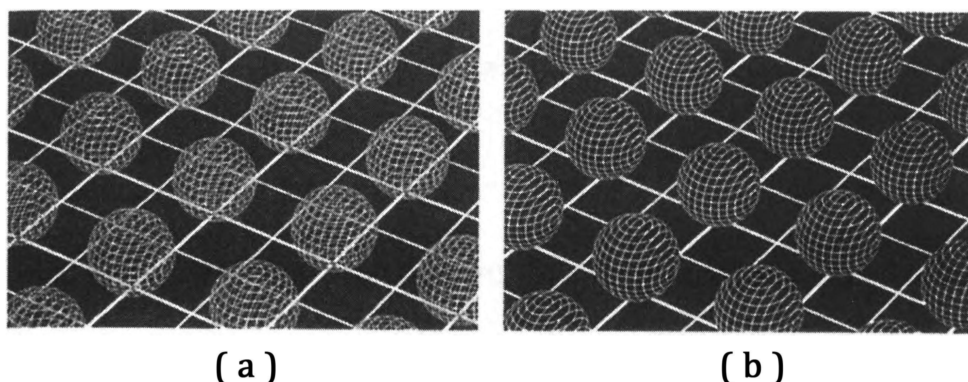


FIGURA 12.8. Un primer plano de un universo con las tres dimensiones normales, representadas por la malla, y **(a)** dos dimensiones enrolladas en forma de esferas huecas, y (b) tres dimensiones enrolladas en forma de bolas sólidas.

Pasemos a una dimensión más. En la figura 12.8a considerábamos sólo la superficie de las esferas. Imagine ahora que, como en la figura 12.8b, el tejido del espacio incluye también el interior de las esferas —nuestro pequeño gusano de tamaño de Planck puede taladrar la esfera, como hacen los gusanos ordinarios con las manzanas, y moverse libremente por su interior—. Especificar la posición del gusano requeriría ahora seis elementos de información: tres para situar su posición en las dimensiones espaciales extendidas habituales, y tres más para situar su posición en la bola cosida en ese punto (latitud, longitud, profundidad de penetración). Sumando el tiempo, éste es así un ejemplo de un universo con siete dimensiones espaciotemporales.

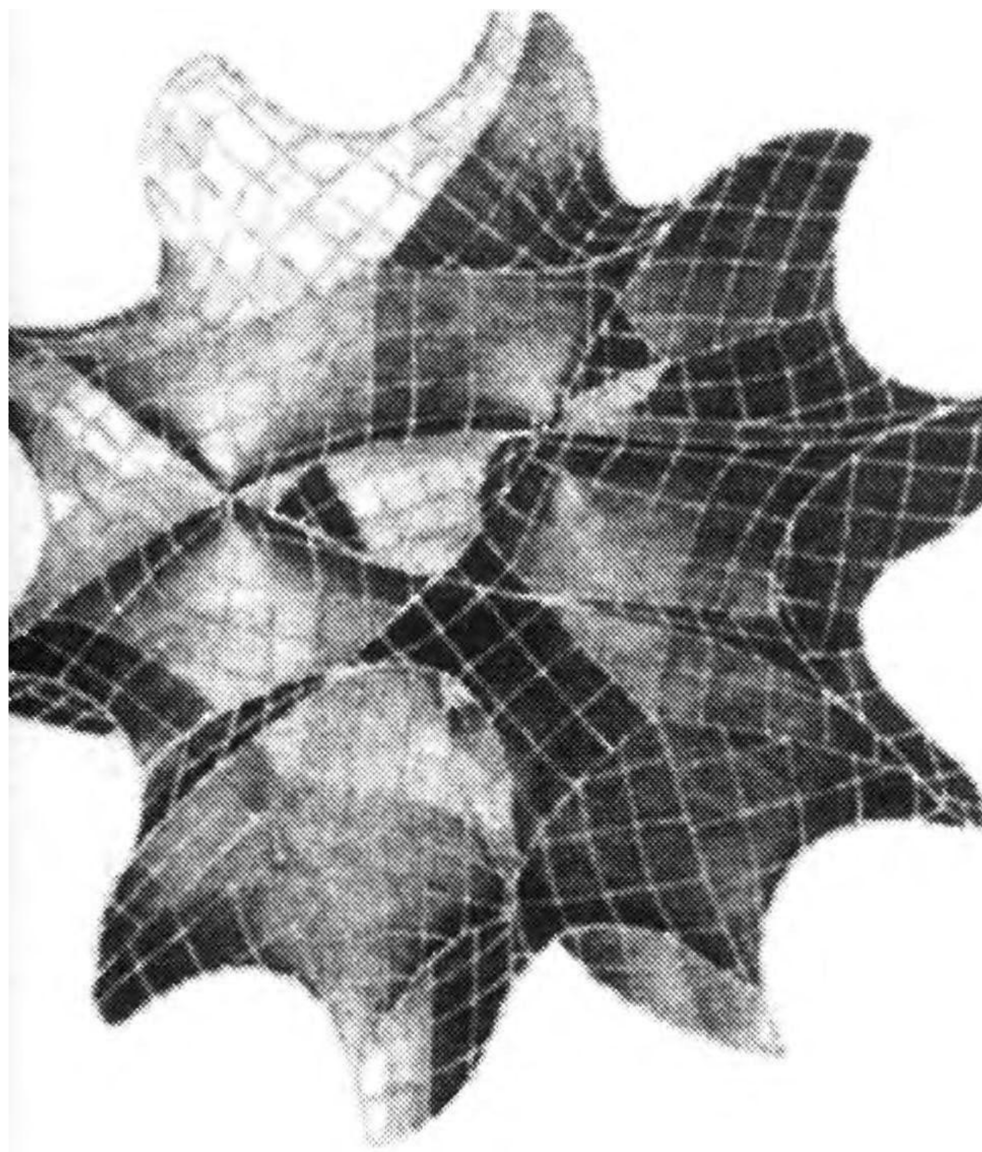
Ahora llega un salto. Aunque es imposible de dibujar, imagine que en cada punto en las tres dimensiones extendidas de la vida cotidiana el universo tiene no una

dimensión extra como en la figura 12.7, no dos dimensiones extras como en la figura 12.8a, no tres dimensiones extras como en la figura 12.8b, sino seis dimensiones espaciales extras. Por supuesto, yo no puedo visualizarlo y nunca he conocido a nadie que pueda hacerlo. Pero su significado es claro. Especificar la localización espacial de un gusano de tamaño de Planck en dicho universo requiere nueve elementos de información: tres para ubicar su posición en las dimensiones extendidas habituales y seis más para ubicar su posición en las dimensiones enrolladas cosidas en ese punto. Cuando se tiene en cuenta también al tiempo, éste es un universo de diez dimensiones espaciotemporales, como el que requieren las ecuaciones de la teoría de cuerdas. Si las seis dimensiones extras están suficientemente enrolladas, escaparían fácilmente a la detección.

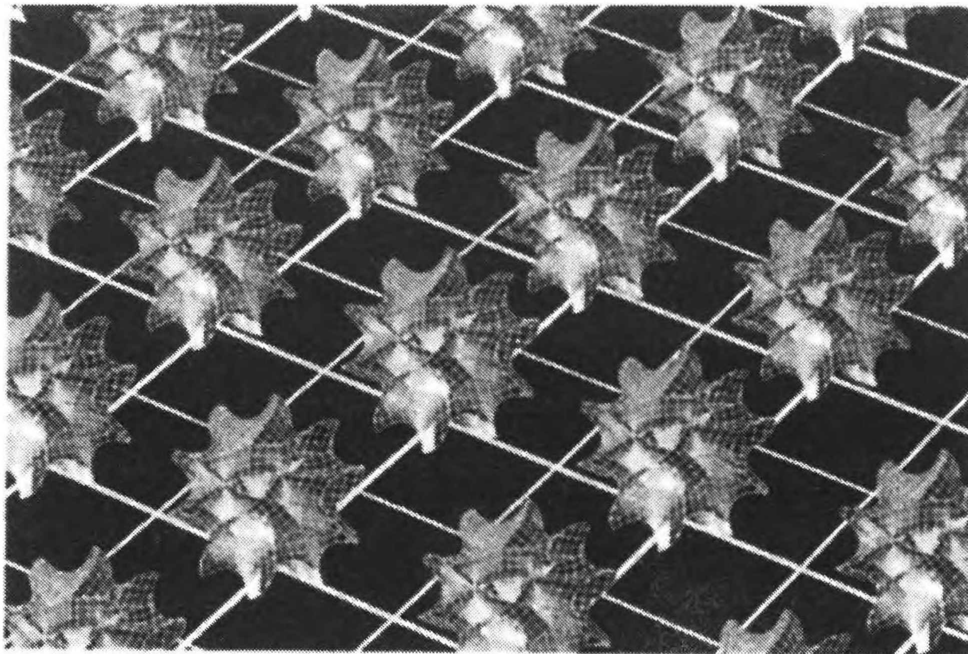
La forma de las dimensiones ocultas

Las ecuaciones de la teoría de cuerdas determinan en realidad más que sólo el número de dimensiones espaciales. También determinan los tipos de formas que pueden adoptar las dimensiones extra.[12.18] En las figuras anteriores nos centrábamos en las formas más simples —círculos, esferas huecas, bolas sólidas— pero las ecuaciones de la teoría de cuerdas escogen una clase significativamente más complicada de formas hexadimensionales conocidas como formas de Calabi-Yau o espacios de Calabi-Yau. Estas formas reciben el nombre de dos matemáticos, Eugenio Calabi y Shing-Tung Yau, que las descubrieron matemáticamente mucho antes de que se entendiera su relevancia para la teoría de cuerdas; una ilustración aproximada de un ejemplo se da en la figura

12.9a. Tenga en cuenta que en esta figura un gráfico bidimensional ilustra un objeto hexadimensional, y esto produce una variedad de distorsiones importantes. Incluso así, la imagen da una vaga idea de cómo son estas formas. Si la forma de Calabi-Yau particular de la figura 12.9a constituyera las seis dimensiones extras de la teoría de cuerdas, en escalas ultramicroscópicas el espacio tendría la forma que se ilustra en la figura 12.9b. Puesto que la forma de Calabi-Yau estaría cosida en cada punto en las tres dimensiones habituales, usted y yo y cualquier otro estaríamos ahora rodeados y llenos de estas pequeñas formas. Literalmente, cuando usted caminara de un lugar a otro, su cuerpo atravesaría las nueve dimensiones, circunnavegando rápida y repetidamente la forma completa, lo que en promedio haría que pasase desapercibido que usted estaba atravesando las seis dimensiones extras.



(a)



(b)

FIGURA 12.9. **(a)** Un ejemplo de una forma de Calabi-Yau. **(b)** Una porción muy amplificada del espacio con dimensiones adicionales en forma de una minúscula forma de Calabi-Yau.

Si estas ideas son correctas, el tejido ultramicroscópica del universo está bordado con la más rica de las texturas.

Física de cuerdas y dimensiones extras

La belleza de la relatividad general reside en que la física de la gravedad está controlada por la geometría del espacio. Con las dimensiones espaciales extras propuestas por la teoría de cuerdas, usted conjeturaría naturalmente que el poder de la geometría para determinar la física aumentaba sustancialmente. Y lo hace. Veamos esto primero

asumiendo una pregunta que hasta ahora he pasado por alto. ¿Por qué la teoría de cuerdas requiere diez dimensiones espaciotemporales? Ésta es una pregunta difícil de responder sin matemáticas, pero déjeme explicar lo suficiente para ilustrar cómo se reduce a un intercambio entre geometría y física.

Imagine una cuerda que está obligada a vibrar sólo en la superficie bidimensional en un tablero de mesa plano. La cuerda podrá ejecutar varias pautas vibracionales, pero sólo aquellas que impliquen movimiento en las dirección izquierda/derecha y delante/detrás de la superficie de la mesa. Si entonces se libera la cuerda para que vibre en la tercera dimensión, con movimiento en la dimensión arriba/abajo que se sale de la superficie de la mesa, se harán accesibles pautas vibracionales adicionales. Ahora, aunque es difícil representarla en más de tres dimensiones, esta conclusión —que más dimensiones significa más pautas vibracionales— es general. Si una cuerda puede vibrar en una cuarta dimensión espacial, puede ejecutar más pautas vibracionales que las que podría ejecutar en sólo tres; si una cuerda puede vibrar en una quinta dimensión espacial, puede ejecutar más pautas vibracionales de lo que podría hacer en sólo cuatro, y así sucesivamente. Ésta es una idea importante, porque hay una ecuación en la teoría de cuerdas que exige que el número de pautas vibracionales independientes satisfaga una ligadura precisa. Si se viola la ligadura, las matemáticas de la teoría de cuerdas fallan y sus ecuaciones se quedan sin significado. En un universo con tres dimensiones espaciales el número de pautas vibracionales es demasiado pequeño y la ligadura no se satisface; con cuatro dimensiones espaciales, el número de pautas vibracionales sigue siendo demasiado pequeño; con cinco, seis, siete u ocho dimensiones sigue siendo demasiado pequeño; pero

con nueve dimensiones espaciales, la ligadura sobre el número de pautas vibracionales queda perfectamente satisfecha. Y así es cómo la teoría de cuerdas determina el número de dimensiones espaciales.[*37], [12.19]

Aunque esto ilustra bien el juego entre geometría y física, su asociación dentro de la teoría de cuerdas va más lejos, y de hecho, ofrece una manera de abordar un problema crítico que encontramos antes. Recordemos que al tratar de establecer un contacto detallado entre las pautas vibracionales de cuerdas y los tipos de partículas conocidas, los físicos tropezaron con problemas. Encontraron que había demasiadas pautas vibracionales de cuerdas sin masa y, además, las propiedades detalladas de las pautas vibracionales no encajaban con las de la materia y las fuerzas conocidas. Pero lo que yo no mencioné antes, porque todavía no habíamos discutido la idea de dimensiones extras, es que aunque estos cálculos daban cuenta del número de dimensiones extras (lo que explica en parte, por qué se encontraban tantas pautas vibracionales extras), no tenían en cuenta el pequeño tamaño y la forma compleja de las dimensiones extras —suponían que todas las dimensiones eran planas y totalmente desplegadas— y eso supone una diferencia sustancial.

Las cuerdas son tan pequeñas que incluso cuando las dimensiones extras están estrujadas en una forma de Calabi-Yau, las cuerdas siguen vibrando en dichas direcciones. Esto es extraordinariamente importante por dos razones. En primer lugar, asegura que las cuerdas vibran siempre en las nueve dimensiones espaciales, y con ello la ligadura sobre el número de pautas vibracionales sigue satisfaciéndose, incluso cuando las dimensiones extras están apretadamente estrujadas. En segundo lugar, de la misma forma que las pautas vibracionales de las corrientes de aire sopladas a través de una tuba están afectadas por

las curvas y vueltas del instrumento, las pautas vibracionales de las cuerdas están influidas por las curvas y vueltas en la geometría de las seis dimensiones extras. Si usted cambiara la forma de una tuba haciendo un pasaje más estrecho o haciendo un pabellón más largo, las pautas vibracionales del aire, y con ello el sonido del instrumento, cambiarían. Análogamente, si la forma y el tamaño de las dimensiones extras fueran modificados, las propiedades precisas de cada pauta vibracional posible de una cuerda también serían significativamente afectadas. Y puesto que la pauta vibracional de una cuerda determina su masa y su carga, esto significa que las dimensiones extras desempeñan un papel central en la determinación de las propiedades de las partículas.

Ésta es una idea clave. *El tamaño y forma precisos de las dimensiones extras tienen un profundo impacto en las pautas vibracionales de cuerdas, y con ello en las propiedades de las partículas.* Puesto que la estructura básica del universo —desde la formación de galaxias y estrellas a la existencia de vida tal como la conocemos— depende sensiblemente de las propiedades de las partículas, el código del cosmos puede muy bien estar escrito en la geometría de una forma de Calabi-Yau.

Vimos un ejemplo de una forma de Calabi-Yau en la figura 12.9, pero hay al menos centenares de miles de otras posibilidades. La pregunta, entonces, es qué forma de Calabi-Yau, si existe, constituye la parte extradimensional del tejido del espaciotiempo. Ésta es una de las preguntas más importantes a las que se enfrenta la teoría de cuerdas, puesto que sólo con una elección definida de la forma de Calabi-Yau se determinan las características detalladas de las pautas vibracionales de cuerdas. Hasta la fecha la pregunta sigue sin respuesta. La razón es que la comprensión actual de las ecuaciones de la teoría de

cuerdas no ofrece ninguna idea de cómo escoger una forma entre las muchas posibles; desde el punto de vista de las ecuaciones conocidas, cada forma de Calabi-Yau es tan válida como cualquier otra. Las ecuaciones ni siquiera determinan el tamaño de las dimensiones extras. Puesto que no vemos las dimensiones extras, éstas deben de ser pequeñas, pero cuán pequeñas exactamente sigue siendo una cuestión abierta.

¿Es esto un defecto fatal de la teoría de cuerdas? Es posible. Pero yo no lo creo. Como discutiremos más en detalle en el próximo capítulo, las ecuaciones exactas de la teoría de cuerdas han esquivado a los teóricos durante muchos años, y por eso buena parte del trabajo ha utilizado ecuaciones aproximadas. Éstas han suministrado ideas sobre muchas características de la teoría de cuerdas, pero para ciertas cuestiones —incluyendo la forma y el tamaño exactos de las dimensiones extras— las ecuaciones aproximadas se quedan cortas. A medida que seguimos afinando nuestro análisis matemático y mejoramos estas ecuaciones aproximadas, determinar la forma de las dimensiones extras es un objetivo primario —y en mi opinión alcanzable—. Hasta ahora, este objetivo sigue estando más allá de nuestro alcance.

No obstante, aún podemos preguntar si cualquier elección de una forma de Calabi-Yau da pautas vibracionales de cuerdas que se aproximen estrechamente a las partículas conocidas. Y aquí la respuesta es bastante satisfactoria.

Aunque estamos lejos de haber investigado todas las posibilidades, se han encontrado ejemplos de formas de Calabi-Yau que dan lugar a pautas vibracionales de cuerdas en acuerdo aproximado con las tablas 12.1 y 12.2. Por ejemplo, a mediados de la década de 1980 Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger y Edward Witten (el

equipo de físicos que advirtió la relevancia de las formas de Calabi-Yau para la teoría de cuerdas) descubrieron que cada agujero —el término se utiliza en un sentido matemático definido de forma precisa— contenido dentro de una forma de Calabi-Yau da lugar a una *familia* de pautas vibracionales de cuerdas de energía mínima. Una forma de Calabi-Yau con tres agujeros proporcionaría así una explicación para la estructura repetitiva de tres familias de partículas elementales en la tabla 12.1. De hecho, se han encontrado varias formas de Calabi-Yau con tres agujeros. Además, entre estas formas de Calabi- Yau preferidas hay unas que también dan el número correcto de partículas mensajeras así como las cargas eléctricas y las propiedades de las fuerzas nucleares correctas para encajar las partículas de las tablas 12.1 y 12.2.

Éste es un resultado extraordinariamente alentador; en modo alguno estaba asegurado. Al fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica, la teoría de cuerdas podría haber alcanzado un objetivo sólo para encontrar que era imposible acercarse al otro objetivo igualmente importante de explicar las propiedades de las partículas de materia y de fuerza conocidas. Los investigadores se alegran de que la teoría haya evitado esta desagradable posibilidad. Ir más lejos y calcular las masas exactas de las partículas es mucho más desafiante. Como discutimos, las partículas en las tablas 12.1 y 12.2 tienen masas que se desvían de las vibraciones de cuerdas de energía mínima —cero veces la masa de Planck— en menos de una parte en mil billones. Calcular tales desviaciones infinitesimales requiere un nivel de precisión más allá de lo que podemos conseguir con nuestra comprensión actual de las ecuaciones de la teoría de cuerdas.

En la práctica, sospecho, como hacen muchos otros teóricos de cuerdas, que las masas minúsculas en las tablas

12.1 y 12.2 aparecen en teoría de cuerdas de forma similar a como lo hacen en el modelo estándar. Recordemos del capítulo 9 que en el modelo estándar un campo de Higgs toma un valor no nulo en todo el espacio, y la masa de una partícula depende de cuánta fuerza de fricción experimente cuando se mueve a través del océano de Higgs. Un escenario similar aparece probablemente en la teoría de cuerdas. Si todo un enorme conjunto de cuerdas vibra de la manera coordinada correcta en todo el espacio, puede ofrecer un fondo uniforme que para cualquier propósito sería indistinguible de un océano de Higgs. Las vibraciones de cuerdas que inicialmente daban masa cero adquirirían entonces minúsculas masas no nulas gracias a la fuerza de fricción que experimentan cuando se mueven y vibran a través de la versión del océano de Higgs en teoría de cuerdas.

Nótese, no obstante, que en el modelo estándar la fuerza de fricción experimentada por una partícula dada —y con ello la masa que adquiere— está determinada por medida experimental y especificada como un dato de entrada para la teoría. En la versión de teoría de cuerdas, la fuerza de fricción —y con ello las masas de las pautas vibracionales— se remontaría a las interacciones entre cuerdas (puesto que el océano de Higgs estaría hecho de cuerdas) y debería ser calculable. La teoría de cuerdas, al menos en principio, permite que todas las propiedades de las partículas sean determinadas por la propia teoría.

Nadie lo ha conseguido, pero, como se ha subrayado, la teoría de cuerdas sigue siendo un trabajo en curso. Con tiempo, los investigadores confían en entender por completo el enorme potencial de esta aproximación a la unificación. La motivación es fuerte porque la recompensa potencial es grande. Con trabajo duro y bastante suerte la teoría de cuerdas puede explicar algún día las propiedades

de las partículas fundamentales y, a su vez, explicar por qué el universo es como es.

El tejido del cosmos según la teoría de cuerdas

Incluso si buena parte de la teoría de cuerdas está aún más allá de los límites de nuestra comprensión, ya ha mostrado nuevas vistas espectaculares. Y lo más sorprendente, al salvar el abismo entre relatividad general y mecánica cuántica, la teoría de cuerdas ha revelado que el tejido del cosmos puede tener muchas más dimensiones que las que percibimos directamente —dimensiones que pueden ser la clave para resolver algunos de los más profundos misterios del universo—. Además, la teoría sugiere que las nociones familiares de espacio y tiempo no se extienden al reino subplanckiano, lo que sugiere que el espacio y el tiempo tal como los entendemos actualmente pueden ser meras aproximaciones a conceptos más fundamentales que aún esperan a que los descubramos.

En los instantes iniciales del universo, estas características del tejido del espaciotiempo que, hoy, sólo pueden ser accesibles matemáticamente, habrían sido manifiestas. Al principio, cuando las tres dimensiones espaciales familiares eran también pequeñas, hubiera habido poca o ninguna diferencia entre las que ahora llamamos dimensiones grandes y dimensiones enrolladas de la teoría de cuerdas. Su disparidad de tamaño actual sería debida a la evolución cosmológica que, de una forma que todavía no entendemos, habría escogido tres de las dimensiones espaciales como especiales, y sometido sólo a ellas a los 14.000 millones de años de expansión discutidos en capítulos anteriores. Mirando aún más atrás en el tiempo, todo el universo observable estaría contraído en el

dominio subplanckiano, de modo que lo que hemos estado llamando la región borrosa (en la figura 10.6) puede ahora identificarse como el reino donde el espacio y el tiempo familiares tienen aún que emerger a partir de las entidades más fundamentales —cualesquiera que puedan ser— que la investigación actual se esfuerza por entender.

Un progreso adicional en la comprensión del universo primordial, y con ello en la valoración del origen del espacio, el tiempo y la flecha del tiempo, requiere una buena puesta a punto de las herramientas teóricas que utilizamos para entender la teoría de cuerdas —un objetivo que, no hace demasiado tiempo, parecía noble pero distante. Como veremos ahora, con el desarrollo de la teoría M, el progreso ha superado muchas de las predicciones optimistas de incluso los más optimistas.

QUINTA PARTE

Realidad e imaginación

13

El universo en una brana

Especulaciones sobre el espacio y el tiempo en la teoría M

La teoría de cuerdas tiene una de las historias más retorcidas de cualquier avance científico importante. Incluso hoy, más de tres décadas después de su articulación inicial, la mayoría de los que trabajan en la teoría creen que aún no tenemos una respuesta general para la pregunta elemental: ¿qué es la teoría de cuerdas? Sabemos bastante *sobre* teoría de cuerdas. Conocemos sus características básicas, conocemos sus éxitos clave, conocemos lo que promete y conocemos los desafíos a los que se enfrenta; también podemos utilizar las ecuaciones de la teoría de cuerdas para hacer cálculos detallados de cómo se comportarían las cuerdas e interaccionarían en un amplio abanico de circunstancias. Pero la mayoría de los investigadores tienen la sensación de que nuestra formulación actual de la teoría de cuerdas carece aún del tipo de principio nuclear que encontramos en el corazón de otros avances importantes. La relatividad especial tiene la constancia de la velocidad de la luz. La relatividad general tiene el principio de equivalencia. La mecánica cuántica tiene el principio de incertidumbre. Los teóricos de cuerdas

siguen buscando un principio semejante que capture de la misma forma la esencia de la teoría.

En gran medida, esta deficiencia existe porque la teoría de cuerdas se desarrolló por partes en lugar de emerger de una gran visión global. El *objetivo* de la teoría de cuerdas —la unificación de todas las fuerzas y toda la materia en un marco mecanocuántico— es tan grande como suena, pero la evolución de la teoría ha estado claramente fragmentada.

Tras su descubrimiento casual hace más de tres décadas, la teoría de cuerdas se ha ido pavimentando a medida que un grupo de teóricos descubría propiedades clave estudiando *unas* ecuaciones, mientras que otro grupo revelaba implicaciones críticas examinando *otras.*

Los teóricos de cuerdas pueden asemejarse a una tribu primitiva excavando una nave espacial enterrada con la que se han encontrado. Tanteando y jugueteando, la tribu descubriría lentamente aspectos del funcionamiento de la nave espacial, y esto alimentaría una sensación de que todos los botones trabajan conjuntamente de una manera coordinada y unificada. Una sensación similar domina entre los teóricos de cuerdas. Resultados encontrados a lo largo de muchos años de investigación están encajando y convergiendo. Esto ha infundido una confianza creciente entre los investigadores en que la teoría de cuerdas se está acercando a un marco coherente y poderoso —que aún tiene que ser completamente desenterrado, pero que en definitiva expondrá el funcionamiento interno de la Naturaleza con una claridad y generalidad sin precedentes.

En tiempos recientes, nada ilustra esto mejor que la idea que prendió la mecha de la *segunda revolución de las supercuerdas* —una revolución que, entre otras cosas, mostró otra dimensión oculta entrelazada en el tejido espacial, abrió nuevas posibilidades para test experimentales de la teoría de cuerdas, sugirió que nuestro

universo puede ser uno entre otros, reveló que los agujeros negros pueden ser creados en la próxima generación de aceleradores de alta energía y llevó a nueva teoría cosmológica en la que el tiempo y su flecha, como el esbelto arco de los anillos de Saturno, puede dar vueltas una y otra vez.

La segunda revolución de las supercuerdas

Hay un detalle incómodo en relación con la teoría de cuerdas que aún tengo que exponer, pero que los lectores de mi libro anterior, *El universo elegante,* quizá recuerden. Durante las tres últimas décadas se han desarrollado no una, sino *cinco* versiones distintas de la teoría de cuerdas. Aunque sus nombres no son de interés ahora, se denominan *Tipo 1, Tipo HA, Tipo IIB, Heterótica-0* y *Heterótica-E.* Todas comparten las características esenciales introducidas en el último capítulo —los ingredientes básicos son hebras de energía vibrante— y, como revelaron cálculos en las décadas de 1970 y 1980, cada teoría requiere seis dimensiones espaciales extras; pero cuando se analizan en detalle, aparecen diferencias importantes. Por ejemplo, la teoría Tipo I incluye los lazos de cuerda vibrantes discutidos en el último capítulo, denominados *cuerdas cerradas,* pero a diferencia de las otras teorías de cuerdas, también contiene *cuerdas abiertas,* trozos de cuerdas vibrantes que tienen dos cabos sueltos. Además, los cálculos muestran que la lista de pautas vibracionales de cuerdas y la forma en que cada pauta interacciona con las demás difiere de una formulación a otra.

Los más optimistas de entre los teóricos de cuerdas imaginaban que estas diferencias servirían para eliminar cuatro de las cinco versiones cuando algún día pudiera

llevarse a cabo una comparación detallada con los datos experimentales. Pero, francamente, la mera existencia de cinco formulaciones diferentes de la teoría de cuerdas era una fuente de insatisfacción callada. El sueño de la unificación es un sueño en el que los científicos son llevados a una única teoría del universo. Si la investigación estableciera que sólo un marco teórico podía englobar a la vez a la mecánica cuántica y la relatividad general, los teóricos alcanzarían el nirvana de la unificación. Tendrían un fuerte argumento a favor de la validez del marco incluso en ausencia de verificación experimental directa. Después de todo, ya existe una riqueza de soporte experimental para la mecánica cuántica y la relatividad general, y parece claro como el día que las leyes que gobiernan el universo deberían ser mutuamente compatibles. Si una teoría particular fuera el único arco matemáticamente consistente entre los dos pilares experimentalmente confirmados de la física del siglo xx, eso proporcionaría una prueba poderosa, aunque indirecta, de la inevitabilidad de la teoría.

Pero el hecho de que haya cinco versiones de la teoría de cuerdas, similares en la superficie pero distintas en detalle, parecería querer decir que la teoría de cuerdas no pasa el test de unicidad. Incluso si los optimistas quedan reivindicados algún día y sólo una de las cinco teorías de cuerdas es confirmada experimentalmente, seguiríamos intrigados por la cuestión de por qué hay otras cuatro formulaciones consistentes. ¿Serían las otras cuatro simples curiosidades matemáticas? ¿Tendrían alguna importancia para el mundo físico? ¿Podría ser su existencia la punta de un iceberg teórico en el que científicos más ingeniosos mostraran posteriormente que hay realmente otras cinco versiones, o seis, o siete, o quizá incluso un número inagotable de variaciones matemáticas diferentes sobre un tema de cuerdas?

Durante finales de la década de 1980 y principios de la de 1990, cuando muchos físicos perseguían tenazmente una comprensión de una u otra de las teorías de cuerdas, el enigma de las cinco versiones no era un problema que los investigadores tratasen normalmente en el día a día. Más bien, era una de esas preguntas calladas que todos suponían que sería abordada en un futuro lejano, cuando la comprensión de cada teoría de cuerdas individual se hubiese hecho significativamente más refinada.

Pero en la primavera de 1995, con poca advertencia, estas modestas esperanzas fueron superadas con creces. Basándose en el trabajo de varios teóricos de cuerdas (entre los que se incluyen Chris Hull, Paul Townsend, Ashoke Send, Michael Duff, John Schwarz, y muchos otros), Edward Witten —quien durante dos décadas ha sido el más renombrado teórico de cuerdas del mundo— descubrió una unidad oculta que unía las cinco teorías de cuerdas. Witten demostró que más que ser distintas, las cinco teorías son en realidad tan sólo cinco maneras diferentes de analizar matemáticamente una sola teoría. De la misma forma que las traducciones de un libro en cinco lenguas diferentes podrían parecer, para un lector monolingüe, ser cinco textos distintos, las cinco formulaciones de cuerdas parecían distintas sólo porque Witten tenía que escribir aún el diccionario para traducir entre ellas. Pero una vez revelado, el diccionario ofrecía una demostración convincente de que —como un único texto maestro a partir del que se han hecho las cinco traducciones— una única teoría maestra enlaza las cinco formulaciones de cuerdas. La teoría maestra unificadora ha sido denominada provisionalmente teoría *M,* siendo *M* una percha tentadora cuyo significado —¿Maestra? ¿Majestuosa? ¿Madre? ¿Mágica? ¿Misterio? ¿Matriz?— espera el resultado de una vigorosa investigación en todo el mundo que ahora

trata de completar la nueva visión iluminada por la poderosa idea de Witten.

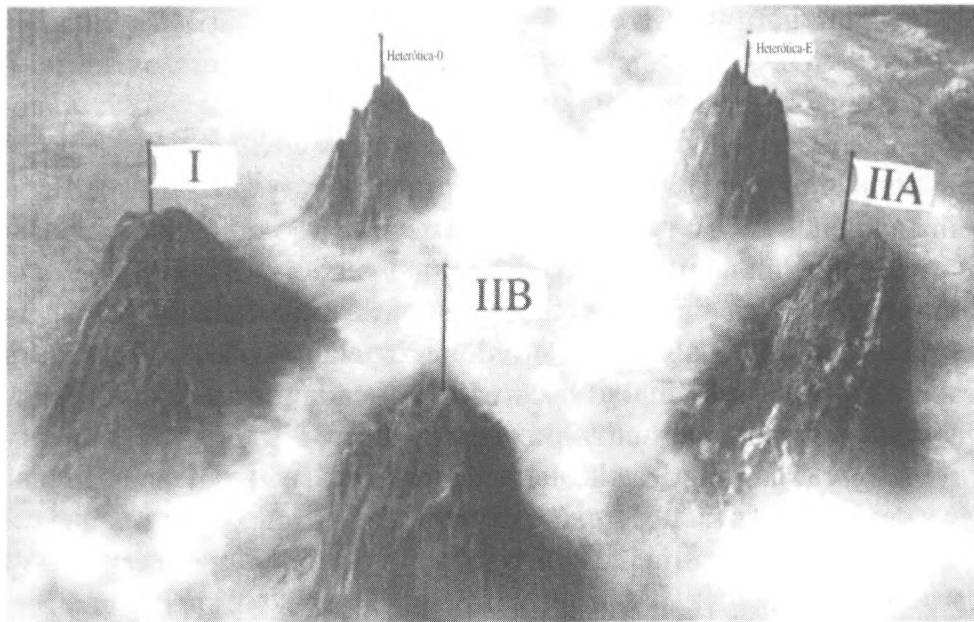
Este descubrimiento revolucionario fue un salto adelante satisfactorio. Witten demostró en uno de los artículos más preciados del campo (y en un importante trabajo posterior con Petr Horava) que la teoría de cuerdas es una única teoría. Los teóricos de cuerdas ya no tenían que matizar a su candidato para la teoría unificada que buscaba Einstein añadiendo, con cierto embarazo, que el marco unificado propuesto carecía de unidad porque venía en cinco versiones diferentes. Por el contrario, la forma de ajustar la propuesta de mayor alcance para una teoría unificada iba a ser el sujeto de una metaunificación. Gracias al trabajo de Witten, la unidad encarnada por cada teoría de cuerdas individual se extendía al marco de cuerdas entero.

La figura 13.1 esboza el estatus de las cinco teorías de cuerdas antes y después del descubrimiento de Witten, y es una buena imagen resumen para tener en mente. Ilustra que la teoría M no es una nueva aproximación per se, sino que al limpiar las nubes promete una formulación más refinada y completa de la ley física que la que proporciona cualquiera de las teorías de cuerdas individuales. La teoría M une y abraza por igual las cinco teorías de cuerdas mostrando que cada una es parte de una síntesis teórica mayor.

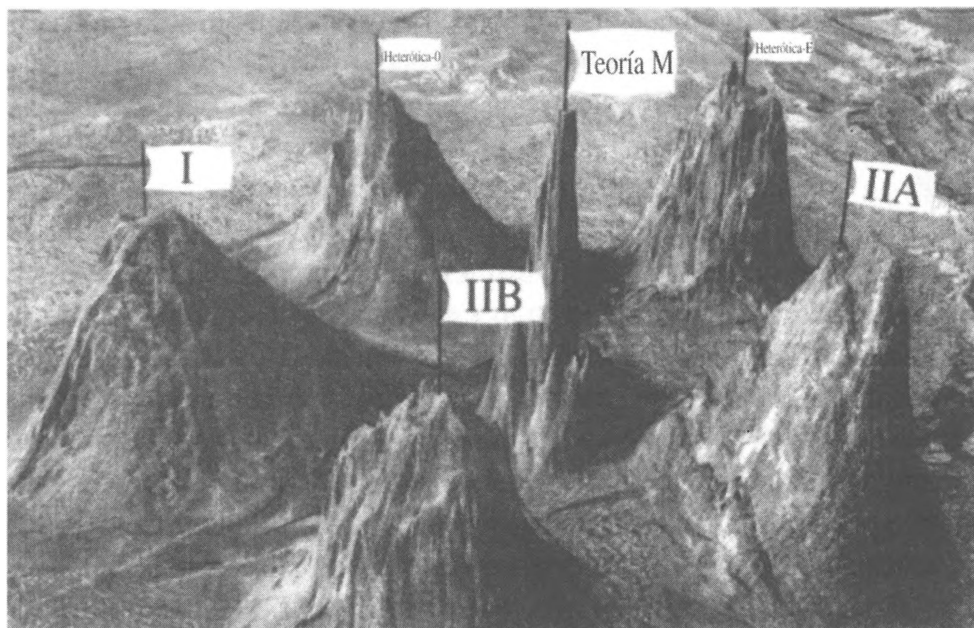
El poder de la traducción

Aunque la figura 13.1 transmite esquemáticamente el contenido esencial del descubrimiento de Witten, expresada de esta manera podría parecerle el interior de una pelota de béisbol. Antes de la idea de Witten, los investigadores pensaban que había cinco versiones independientes de la

teoría de cuerdas; después de su idea, no lo hicieron. Pero si usted no había sabido nunca que había cinco teorías de cuerdas distintas, ¿por qué debería preocuparle que el más inteligente de todos los teóricos de cuerdas demostrara que no son distintas después de todo? En otras palabras, ¿por qué era revolucionario el descubrimiento de Witten y no simplemente una idea modesta que corregía una concepción errónea previa? He aquí por qué. Durante las últimas décadas, los teóricos de cuerdas han estado intrigados repetidamente por un problema matemático. Puesto que las ecuaciones exactas que des criben una cualquiera de las cinco teorías de cuerdas se han mostrado tan difíciles de deducir y analizar, los teóricos han basado buena parte de su investigación en ecuaciones aproximadas con las que es mucho más fácil trabajar. Aunque hay buenas razones para creer que las ecuaciones aproximadas deberían dar, en muchas circunstancias, respuestas próximas a las dadas por las ecuaciones verdaderas, en las aproximaciones —como en las traducciones— siempre falta algo. Por esta razón, algunos problemas clave se han mostrado más allá del alcance matemático de las ecuaciones aproximadas, impidiendo el progreso de forma significativa.


Heterótica-0
Heterótica-E
I
IIA
IIB

(a)


Heterótica-0
Teoría M
Heterótica-E
I
IIA
IIB

(b)

FIGURA 13.1. **(a)** Imagen esquemática de las cinco teorías de cuerdas antes de 1955. (b) Imagen esquemática de la metaunificación revelada por la teoría M.

Para la imprecisión inherente a las traducciones de textos, los lectores tienen un par de remedios inmediatos. La mejor opción, si las capacidades lingüistas del lector están a la altura de la tarea, es consultar el manuscrito original. Por el momento, una opción análoga no está disponible para los teóricos de cuerdas. En virtud de la consistencia del diccionario desarrollado por Witten y otros, tenemos fuerte evidencia de que las cinco teorías de cuerdas son descripciones diferentes de una única teoría maestra, la teoría M, pero los investigadores aún tienen que desarrollar una comprensión completa de este nexo teórico. Hemos aprendido mucho sobre la teoría M en los últimos años, pero aún tenemos mucho que avanzar antes de que alguien pueda afirmar razonablemente que es adecuada o completamente entendida. En teoría de cuerdas es como si tuviéramos cinco traducciones de un texto maestro aún por descubrir.

Otro remedio útil, bien conocido por los lectores de traducciones que o no tienen el original (como en la teoría de cuerdas) o, lo que es más habitual, no entienden el idioma en el que está escrito, es consultar varias traducciones del texto maestro en los idiomas con los que están familiarizados. Los pasajes en los que las traducciones coinciden dan confianza, los pasajes en los que difieren señalan posibles inexactitudes o interpretaciones muy diferentes. Esta es la aproximación que Witten hizo disponible con su descubrimiento de que las cinco teorías de cuerdas son traducciones de la misma teoría subyacente. De hecho, su descubrimiento proporcionó una versión extraordinariamente potente de esta línea de ataque que se

entiende mejor gracias a una ligera ampliación de la analogía de la traducción.

Imagine un manuscrito maestro lleno de un abanico tan enorme de chistes, rimas y sobreentendidos, bromas sensibles a la cultura, que el texto completo no puede expresarse con gracia en ninguno de los cinco idiomas en los que está siendo traducido. Algunos pasajes podrían traducirse al swahili con facilidad, mientras que otras partes podrían mostrarse completamente impenetrables en esta lengua. Muchas intuiciones acerca de estos últimos pasajes podrían emerger de la traducción al inuit; pero en otras secciones esa traducción podría ser completamente opaca. El sánscrito podría captar la esencia de alguno de estos pasajes difíciles, pero para otras secciones particularmente problemáticas las cinco traducciones podrían dejarle parado y sólo el texto maestro sería inteligible. Esto está mucho más cerca de la situación con las cinco teorías de cuerdas. Los teóricos han encontrado que para ciertas cuestiones una de las cinco puede dar una descripción transparente de las implicaciones físicas, mientras que la descripciones dadas por las otras cuatro son demasiado complejas matemáticamente para ser útiles. Y en ello reside el poder del descubrimiento de Witten. Antes de su idea los investigadores en teoría de cuerdas que encontraran situaciones intratablemente difíciles estarían atascados. Pero el trabajo de Witten demostró que cada una de estas cuestiones admite cuatro traducciones matemáticas —cuatro reformulaciones matemáticas— y a veces una de las cuestiones reformuladas se muestra mucho más sencilla de responder. Así, *el diccionario para traducir entre las cinco teorías puede ofrecer a veces un medio de traducir cuestiones imposiblemente difíciles en otras relativamente simples.*

No es infalible. De la misma forma que las cinco traducciones de ciertos pasajes del texto maestro podrían ser igualmente incomprensibles, a veces las descripciones matemáticas que dan las cinco teorías de cuerdas son igualmente difíciles de entender. En tales casos, de la misma forma que necesitaríamos consultar el propio texto original, también necesitaríamos una comprensión plena de la esquiva teoría M para avanzar. Incluso así, en muchas circunstancias el diccionario de Witten ha proporcionado una herramienta nueva y poderosa para analizar la teoría de cuerdas.

Con ello, de la misma forma que cada traducción de un texto completo sirve a un propósito importante, cada formulación de las cuerdas también lo hace. Combinando intuiciones obtenidas desde la perspectiva de cada una de ellas somos capaces de responder preguntas y revelar características que están completamente fuera del alcance de cualquier formulación única de las cuerdas. El descubrimiento de Witten dio así a los teóricos una potencia de fuego cinco veces mayor para avanzar la línea del frente de la teoría de cuerdas. Y eso, en buena parte, es lo que inició una revolución.

Once dimensiones

Así que, con nuestro poder recién adquirido para analizar la teoría de cuerdas, ¿qué ideas han surgido? Han sido muchas. Me centraré en aquellas que han tenido el mayor impacto sobre la historia del espacio y el tiempo.

Una de importancia fundamental, que reveló el trabajo de Witten, es que las ecuaciones aproximadas de la teoría de cuerdas utilizadas en las décadas de 1970 y 1980 para deducir que el universo debe tener nueve dimensiones

espaciales *habían errado en uno el número verdadero.* Su análisis demostraba que la respuesta correcta es que el universo según la teoría M tiene diez dimensiones espaciales, es decir, once dimensiones espaciotemporales. De forma parecida a como Kaluza encontró que un universo con cinco dimensiones espaciotemporales proporcionaba un marco para unificar el electromagnetismo y la gravedad, y de forma parecida a como los teóricos de cuerdas encontraron que un universo con diez dimensiones espaciotemporales proporcionaba un marco para unificar la mecánica cuántica y la relatividad general, Witten encontró que un universo con once dimensiones espaciotemporales proporcionaba un marco para unificar todas las teorías de cuerdas. Como cinco pueblos que, vistos desde el suelo, aparecen completamente separados, pero cuando se ven desde la cima de una montaña —haciendo uso de una dimensión vertical adicional— se ven conectados por una red de senderos y carreteras, la dimensión espacial adicional que emerge del análisis de Witten era crucial para su hallazgo de conexiones entre las cinco teorías de cuerdas.

Aunque el descubrimiento de Witten se ajusta en la pauta histórica de conseguir unidad gracias a más dimensiones, cuando él anunció el resultado en la Conferencia Internacional Anual de Teoría de Cuerdas en 1995, sacudió los fundamentos del campo. Los investigadores, entre los que me incluyo, habían reflexionado largo y tendido sobre las ecuaciones aproximadas que había que usar, y todos tenían confianza en que los análisis habían dicho la última palabra sobre el número de dimensiones. Pero Witten reveló algo sorprendente.

Él demostró que todos los análisis anteriores habían hecho una simplificación matemática que equivalía a

suponer que una hasta entonces no reconocida dimensión espacial sería extraordinariamente pequeña, mucho más pequeña que todas las demás. Tan pequeña, de hecho, que las ecuaciones de la teoría de cuerdas aproximadas que todos los investigadores estaban utilizando carecían del poder de resolución para revelar siquiera un indicio matemático de la existencia de la dimensión. Y eso condujo a todo el mundo a concluir que la teoría de cuerdas sólo tenía nueve dimensiones espaciales. Pero con las nuevas ideas del marco unificado de la teoría M, Witten pudo ir más allá de las ecuaciones aproximadas, sondear de forma más precisa y demostrar que una dimensión espacial había sido pasada por alto. De este modo, Witten demostró que los cinco marcos decadimensionales que los teóricos de cuerdas habían desarrollado durante más de una década eran en realidad cinco descripciones aproximadas de una única teoría subyacente de once dimensiones.

Usted podría preguntarse si esta comprensión inesperada invalidaba el trabajo anterior en teoría de cuerdas. En general, no lo hacía. La décima dimensión espacial recién encontrada añadía una característica imprevista a la teoría, pero si la teoría M/de cuerdas es correcta, y si la décima dimensión espacial resultase ser mucho más pequeña que todas las demás —como durante mucho tiempo se había supuesto inadvertidamente— el trabajo anterior seguiría siendo válido. Sin embargo, puesto que las ecuaciones conocidas siguen siendo incapaces de fijar los tamaños o las formas de las dimensiones extras, los teóricos de cuerdas han dedicado mucho esfuerzo durante los últimos años a investigar la nueva posibilidad de una décima dimensión espacial no tan pequeña. Entre otras cosas, los resultados de amplio alcance de estos estudios han colocado la ilustración esquemática del poder unifi-

cador de la teoría M, figura 13.1, sobre una firme base matemática.

Sospecho que la actualización de diez a once dimensiones —independientemente de su gran importancia para la estructura matemática de la teoría M/de cuerdas— no altera sustancialmente la imagen mental que se ha hecho usted de la teoría. Para todos salvo los iniciados, tratar de imaginar siete dimensiones retorcidas es un ejercicio prácticamente idéntico a tratar de imaginar seis.

Pero una segunda, e íntimamente relacionada, idea resultante de la segunda revolución de las supercuerdas sí altera la imagen intuitiva básica de la teoría de cuerdas. Las ideas colectivas de varios investigadores —Witten, Duff, Hull, Townsend y muchos otros— establecieron que *la teoría de cuerdas no es tan sólo una teoría de cuerdas.*

Branas

Una pregunta natural, que quizá se le haya ocurrido en el último capítulo, es ¿por qué cuerdas? ¿Por qué los ingredientes unidimensionales son tan especiales? Vimos que algo crucial para reconciliar la mecánica cuántica y la relatividad general es que las cuerdas no son puntos sino que tienen un tamaño no nulo. Pero ese requisito puede ser satisfecho con ingredientes bidimensionales como discos en miniatura o Frisbees, o por ingredientes tridimensionales, con formas como pelotas de béisbol o trozos de arcilla. O, puesto que la teoría tiene tal abundancia de dimensiones espaciales, podemos imaginar incluso ingredientes con aún más dimensiones. ¿Por qué no desempeñan estos ingredientes ningún papel en nuestras teorías fundamentales?

En la década de 1980 y comienzos de la de 1990 la mayoría de los teóricos de cuerdas tenían lo que parecía una respuesta convincente. Argumentaban que *había* habido intentos de formular una teoría fundamental de la materia basada en constituyentes tipo gotas por parte, entre otros, de iconos de la física del siglo xx tales como Wemer Hei- senberg y Paul Dirac. Pero su trabajo, así como muchos estudios posteriores, demostró que era extraordinariamente difícil desarrollar una teoría basada en gotas minúsculas que satisficiera los requisitos físi- eos más básicos —por ejemplo, asegurar que todas las probabilidades mecanocuánticas estén entre cero y uno (no puede darse ningún sentido a probabilidades negativas o a probabilidades mayores que uno), y prohibir comunicación más rápida que la luz—. En caso de partículas puntuales, medio siglo de investigación iniciada en la década de 1920 demostraba que estas condiciones podían ser satisfechas (mientras se ignorase la gravedad). Y en la década de 1980, más de una década de investigación por parte de Schwarz, Scherk, Green y otros estableció, para sorpresa de la mayoría de los investigadores, que las condiciones también podían ser satisfechas por ingredientes unidimensionales, cuerdas (lo que necesariamente *incluía* la gravedad). Pero parecía imposible pasar a ingredientes fundamentales con dos o más dimensiones espaciales. La razón, dicho en pocas palabras, es que el número de simetrías respetado por las ecuaciones tiene un máximo pronunciado para objetos unidimensionales (cuerdas) y cae de forma brusca para otras dimensiones. Las simetrías en cuestión son más abstractas que las discutidas en el capítulo 8 (tienen que ver con cómo cambian las ecuaciones si, mientras se estudia el movimiento de una cuerda o un ingrediente de dimensión más alta, hacemos un zoom que cambia súbita y arbitrariamente la resolución de nuestras observaciones).

Estas transformaciones se muestran críticas para formular un conjunto físicamente razonable de ecuaciones, y parecía que más allá de las cuerdas la fecundidad de simetrías requerida estaba ausente.[13.1]

Por todo lo anterior, la mayoría de los teóricos de cuerdas sufrieron otra conmoción cuando el artículo de Witten y una avalancha de resultados posteriores[13.2] llevaron a la comprensión de que la teoría de cuerdas, y el marco M-teórico a la que ahora pertenece, sí contiene otros ingredientes además de las cuerdas. Los análisis demostraron que hay objetos bidimensionales llamados, de forma bastante natural, *membranas* (otro posible significado para la «M» en la teoría M) o —como deferencia para nombrar sistemáticamente a sus primas de dimensiones más altas— *dos-branas.* Hay objetos con tres dimensiones espaciales llamados *tres-branas* y, aunque cada vez más difíciles de visualizar, los análisis demostraron que hay también objetos con *p* dimensiones espaciales, donde *p* puede ser cualquier número entero menor que diez, conocidas —sin que haya nada despectivo en ello— como *p-branas.* Así, las cuerdas son sólo un ingrediente en la teoría de cuerdas, no el ingrediente.

Estos otros ingredientes habían escapado antes a la investigación teórica por la misma razón que lo hizo la décima dimensión espacial: las ecuaciones de cuerdas aproximadas se mostraron demasiado toscas para revelarlos. En los contextos teóricos que los investigadores de cuerdas habían investigado matemáticamente, resulta que todas las *p*- branas son significativamente más pesadas que las cuerdas. Y cuanto más masivo es algo, más energía se requiere para producirlo. Pero una limitación de las ecuaciones de cuerdas aproximadas —una limitación inherente en las ecuaciones y bien conocida para todos los teóricos de cuerdas— es que se hacen cada vez menos

exactas cuando las entidades y procesos que describen implican más y más energía. A las energías extremas relevantes para las /?-branas, las ecuaciones aproximadas carecían de precisión para mostrar las branas que moran en las sombras, y por eso es por lo que pasaron décadas sin que su presencia fuera advertida en las matemáticas. Pero con los diversos replanteamientos y nuevas aproximaciones proporcionadas por el marco unificado M-teórico, los investigadores fueron capaces de saltar algunos de los obstáculos técnicos anteriores, y allí, en una visión matemática completa, encontraron toda una panoplia de ingredientes de dimensiones más altas.[13.3]

La revelación de que hay otros ingredientes además de cuerdas en la teoría de cuerdas no invalida ni hace obsoleto el trabajo anterior más que lo hacía el descubrimiento de la décima dimensión espacial. La investigación muestra que si las branas de dimensiones más altas son mucho más masivas que las cuerdas —como había sido supuesto inconscientemente en los estudios previos— ellas tienen un mínimo impacto sobre un amplio abanico de cálculos teóricos. Pero de la misma forma que la décima dimensión espacial no necesita ser mucho más pequeña que las demás, tampoco las branas de dimensiones más altas tienen que ser mucho más pesadas. Hay una variedad de circunstancias, siempre hipotéticas, en las que la masa de una brana de dimensiones más altas puede ser comparable con las pautas vibracionales de cuerdas de mínima energía, y en tales casos la brana sí tiene un impacto importante en la física resultante. Por ejemplo, mi propio trabajo con Andrew Strominger y David Morrison demostró que una brana puede enrollarse alrededor de una porción esférica de una forma de Calabi-Yau, de forma muy parecida a como el plástico se enrolla alrededor de una fruta envasada al vacío; si la porción de espacio se contrajera, la breña enrollada

también se contraería, haciendo que disminuyera su masa. Esta disminución en la masa, pudimos demostrar, permite que la porción de espacio colapse por completo y se rasgue —el propio espacio puede rasgarse— mientras que la brana enrollada asegura que no hay consecuencias físicas catastróficas. Discutí en detalle este punto en *El universo elegante* y volveré brevemente a ello cuando discutamos el viaje en el tiempo en el capítulo 15, de modo que no voy a desarrollarlo más aquí. Pero este apunte aclara que las branas de dimensiones más altas pueden tener un efecto importante en la física de la teoría de cuerdas.

Para lo que ahora nos interesa, sin embargo, hay otra manera en que las branas tienen un impacto profundo en la visión del universo según la teoría M/de cuerdas. La gran extensión del cosmos —la totalidad del espaciotiempo del que somos conscientes— quizá no sea otra cosa que una enorme brana. Nuestro mundo puede ser un mundobrana.

Mundobrana

Poner a prueba la teoría de cuerdas es un desafío porque las cuerdas son ultrapequeñas. Pero recuerde cuál era la física que determinaba el tamaño de las cuerdas. La partícula mensajera de la gravedad —el gravitón— está entre las pautas vibracionales de cuerdas de energía más baja, y la intensidad de la fuerza gravitatoria que comunica es proporcional a la longitud de la cuerda. Puesto que la gravedad es una fuerza tan débil, la longitud de la cuerda debe ser minúscula; los cálculos muestran que debe estar dentro de un factor de diez más o menos de la longitud de Planck para la pauta vibracional gravitónica de la cuerda para comunicar una fuerza gravitatoria de la intensidad observada.

Dada esta explicación, vemos que una cuerda altamente energética no está restringida a ser minúscula, puesto que ya no tiene ninguna conexión directa con la partícula gravitón (el gravitón es una pauta vibracional de masa cero y baja energía). De hecho, cuanto más energía se bombea en una cuerda, al principio vibrará cada vez más frenéticamente. Pero llegado un cierto momento, la energía adicional tendrá un efecto diferente: hará que la longitud de la cuerda aumente, y no hay límite a cuánto puede crecer. Al bombear energía suficiente en una cuerda usted podría incluso hacerla crecer hasta un tamaño macroscópico. Con la tecnología actual no podríamos llegar cerca de lograr esto, pero es posible que en la etapa extraordinariamente energética y caliente que siguió al *big bang* se produjeran cuerdas largas. Si algunas han conseguido sobrevivir hasta hoy, podrían perfectamente estar extendidas en el cielo. Aunque raro, es incluso posible que tales cuerdas largas puedan dejar huellas minúsculas pero detec- tables en los datos que recibimos del espacio, lo que quizá permita que la teoría de cuerdas sea confirmada algún día mediante observaciones astronómicas.

Las p-branas de dimensiones más altas tampoco necesitan ser minúsculas, y puesto que tienen más dimensiones que las cuerdas, se abre una posibilidad cualitativamente nueva. Cuando representamos una cuerda larga —quizá infinitamente larga— imaginamos un objeto unidimensional largo que existe dentro de las tres dimensiones espaciales grandes de la vida cotidiana. Una línea de tendido eléctrico que se extiende hasta donde la vista puede alcanzar proporciona una imagen razonable. Análogamente, si representamos una *dos-brana* grande — quizá infinitamente grande— imaginamos una superficie bidi- mensional grande que existe dentro de las tres dimensiones espaciales grandes de la experiencia común.

Yo no conozco ninguna analogía realista, pero una pantalla de cine al aire libre ridiculamente enorme, extremadamente fina pero tan alta y ancha como la vista puede alcanzar, ofrece una imagen visual que puede servir. Sin embargo, cuando se llega a una *tres-brana* grande nos encontramos en una situación cualitativamente nueva. Una *tres-brana* tiene tres dimensiones, de modo que si fuera grande —quizá infinitamente grande— llenaría las tres dimensiones espaciales grandes. Mientras que una *uno-brana* y una *dos-brana,* como la línea eléctrica y la pantalla del cine, son objetos que existen dentro de nuestras tres dimensiones espaciales grandes, una *tres-brana* grande ocuparía todo el espacio del que somos conscientes.

Esto plantea una posibilidad intrigante. ¿Es posible que nosotros, precisamente ahora, estemos viviendo dentro de una tres-brana? Como Blancanieves, cuyo mundo existe dentro de una pantalla de cine bidimensional —una dos-brana— que a su vez reside dentro de un universo de dimensión más alta (las tres dimensiones espaciales de la sala de cine), quizá todo lo que conocemos existe dentro de una pantalla tridimensional —una tres-brana— que a su vez reside dentro del universo de dimensiones más altas de la teoría M/de cuerdas. ¿No podría ser que lo que Newton, Leibniz, Mach y Einstein llamaban espacio tridimensional sea en realidad una entidad tridimensional particular en la teoría de cuerdas/M? O, en lenguaje más relativista, ¿no podría ser que el espaciotiempo tetradimensional desarrollado por Minkowski y Einstein sea en realidad la estela que deja una tres-brana cuando evoluciona en el tiempo? En resumen, ¿no podría ser el universo que conocemos una brana?**[13.4]**

La posibilidad de que estemos viviendo dentro de una tres-brana —el denominado *escenario mundobrana*— es el último giro en la historia de la teoría M/de cuerdas. Como

veremos, ofrece una forma cualitativamente nueva de considerar la teoría M/de cuerdas, con ramificaciones numerosas y de gran alcance. La física esencial es que las branas son más bien como un velero cósmico; de una forma particular que ahora discutiremos, son muy adhesivas.

Branas adhesivas y cuerdas vibrantes

Una de las motivaciones para introducir el término «teoría M» es que ahora comprendemos que la «teoría de cuerdas» sólo resalta uno de los muchos ingredientes de la teoría. Los estudios teóricos revelaron cuerdas unidimensionales décadas antes de que análisis más refinados descubrieran las branas de dimensiones más altas, de modo que la «teoría de cuerdas» es un concepto histórico. Pero incluso si la teoría M muestra una democracia en la que están representados objetos extensos de dimensiones diversas, las cuerdas siguen desempeñando un papel central en nuestra formulación actual. En un sentido esto es inmediatamente claro. Cuando todas las p-branas de dimensiones más altas son mucho más pesadas que las cuerdas, pueden ser ignoradas, como habían hecho inconscientemente los investigadores desde la década de 1970. Pero hay otra forma más general en la que las cuerdas son primeras entre iguales.

En 1955, muy poco después de que Witten anunciara su idea revolucionaria, Joe Polchinski de la Universidad de California en Santa Bárbara empezó a reflexionar. Años antes, en un artículo que había escrito con Robert Leigh y Jin Dai, Polchinski había descubierto una característica interesante aunque bastante oscura de la teoría de cuerdas. La motivación y el razonamiento de Polchinski eran algo técnicos y los detalles no son esenciales para nuestra

discusión, pero sus resultados sí lo son. El encontró que en ciertas situaciones los puntos extremos de cuerdas abiertas —recuerde, hay segmentos de cuerda con dos cabos sueltos— no serían capaces de moverse con completa libertad. En su lugar, de la misma forma que una cuenta en un alambre es libre de moverse, pero debe seguir el contorno del alambre, y de la misma forma que una bola de billar eléctrico es libre de moverse, pero debe seguir los contornos de la superficie de la mesa del billar eléctrico, los puntos extremos de una cuerda abierta serían libres para moverse pero estarían restringidos a formas o contornos particulares en el espacio. Aunque la cuerda seguiría siendo libre para vibrar, Polchinski y sus colaboradores demostraron que sus puntos extremos estarían «adheridos» o «atrapados» dentro de ciertas regiones.

En algunas situaciones, la región podría ser unidimensional, en cuyo caso los puntos extremos de la cuerda serían como dos cuentas que se deslizan por un alambre, siendo la cuerda propiamente dicha similar a un cordel que las une. En otras situaciones, la región podría ser bidimensional, en cuyo caso los puntos extremos de la cuerda serían muy similares a dos bolas de billar eléctrico conectadas por un cordel, rodando por una mesa de billar eléctrico. Y en otras situaciones, la región podría tener tres, cuatro o cualquier otro número de dimensiones espaciales menor que diez. Estos resultados, como demostraron Polchinski y también Petr Horava y Michael Green, ayudaban a resolver un viejo interrogante en la comparación de cuerdas abiertas y cerradas, pero durante años el trabajo atrajo una atención limitada.**[13.5]** En octubre de 1995, cuando Polchinski terminó de reformular estas ideas anteriores a la luz de los nuevos descubrimientos de Witten, eso cambió.

Una pregunta que el artículo previo de Polchinski dejaba sin una respuesta completa es una que quizá se le haya ocurrido mientras leía el último párrafo: si los puntos extremos de cuerdas abiertas están adheridos dentro de una región concreta del espacio, *¿a qué es a lo que están adheridos!* Los cables y las máquinas de billar eléctrico tienen una existencia tangible independiente de las cuentas o las bolas que están restringidas a moverse a lo largo de ellos. ¿Qué pasa con las regiones del espacio a las que están restringidos los puntos extremos de cuerdas abiertas? ¿Están llenas de algún ingrediente fundamental e independiente de la teoría de cuerdas, un ingrediente que celosamente retiene los puntos extremos de la cuerda abierta? Antes de 1995, cuando se pensaba que la teoría de cuerdas era una teoría de cuerdas solamente, no parecía haber ningún candidato para la tarea. Pero después de la idea de Witten y el torrente de resultados que inspiró, la respuesta se hizo obvia para Polchinski: si los puntos extremos de las cuerdas abiertas están restringidos a moverse dentro de una región /^dimensional del espacio, entonces esa región del espacio debe estar ocupada por una p-brana. [*38] Sus cálculos demostraron que las p-branas recién descubiertas tienen exactamente las propiedades correctas para ser los objetos que ejercen un agarre irrompible sobre los puntos extremos de las cuerdas abiertas, lo que las obliga a moverse dentro de la región *p*-dimensional del espacio que llenan.

Para hacerse una idea mejor de lo que esto significa, mire la figura 13.2. En (a) vemos un par de dos-branas con un manojo de cuerdas abiertas moviéndose y vibrando, todas ellas con sus puntos extremos restringidos a un movimiento a lo largo de sus respectivas branas. Aunque es cada vez más difícil de dibujar, la situación con branas de dimensiones más altas es idéntica. Los puntos extremos de

cuerdas abiertas pueden moverse libremente sobre y dentro de la p-brana, pero no pueden dejar la propia brana. Cuando se trata de la posibilidad de movimiento fuera de una brana las branas son las cosas más adhesivas imaginables. Es también posible que un extremo de una cuerda abierta está adherido a una /?-brana y su otro extremo esté adherido a una *p*- brana diferente, una que puede tener las mismas dimensiones que la primera (figura 13.2b) o puede tener otras (figura 13.2c).

Tras el descubrimiento de Witten de la conexión entre las diversas teorías de cuerdas, el nuevo artículo de Polchinski ofreció un manifiesto para la segunda revolución de supercuerdas. Aunque algunas de las grandes mentes de la física teórica del siglo xx se habían esforzado y habían fracasado en formular una teoría que contenga ingredientes fundamentales con más dimensiones que puntos (cero dimensiones) o cuerdas (una dimensión), los resultados de Witten y Polchinski, junto con ideas importantes de muchos de los investigadores destacados de hoy, mostraron el camino para avanzar. Estos físicos no sólo establecieron que la teoría M/de cuerdas contiene ingredientes de dimensiones más altas, sino que las ideas de Polchinski en particular proporcionaron un medio para analizar teóricamente sus propiedades físicas detalladas (si se demostrase que existen). Las propiedades de una brana, decía Polchinski, están recogidas en gran medida en las propiedades de las cuerdas vibrantes abiertas cuyos puntos extremos

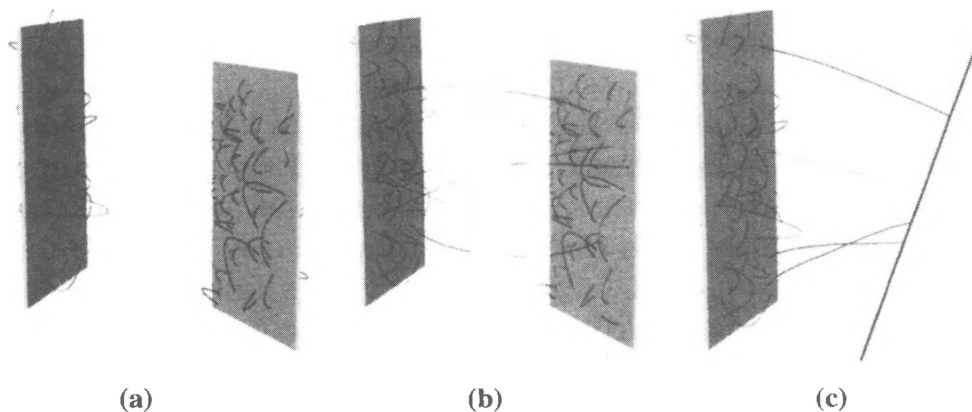


FIGURA 13.2. **(a)** Cuerdas abiertas con puntos extremos unidos a branas dos- dimensionales, o dos-branas. **(b)** Cuerdas que se extienden desde una dos-brana a otra, (c) Cuerdas que se extienden desde una dos-brana a una uno-brana.

contiene. De la misma forma que usted puede aprender mucho sobre una alfombra pasando la mano por su pelo —los trozos de lana cuyos puntos extremos están unidos al reverso de la alfombra— muchas cualidades de una brana pueden determinarse estudiando las cuerdas cuyos puntos extremos sujeta.

Éste era un resultado trascendental. Demostraba que décadas de investigación que produjeron finos métodos matemáticos para estudiar objetos unidimensionales —cuerdas— podían utilizarse para estudiar objetos de dimensiones más altas, p-branas. Luego, de forma maravillosa, Polchinski reveló que el análisis de objetos de dimensiones más altas se reducía, en gran medida, al análisis completamente familiar, aunque aún hipotético, de las cuerdas. En este sentido es en el que las cuerdas son especiales entre los iguales. Si usted entiende el comportamiento de las cuerdas, ya tiene hecho un largo camino hacia la comprensión del comportamiento de las *p*-branas.

Con estas ideas, volvamos al escenario mundobrana —la posibilidad de que estemos viviendo dentro de una tres-brana

Nuestro universo como una brana

Si estamos viviendo dentro de una tres-brana —si nuestro espaciotiempo tetradimensional no es otra cosa que la historia barrida a lo largo del tiempo por una tres-brana— entonces la venerable pregunta de si el espaciotiempo es un algo se vería a una nueva luz. El espaciotiempo tetradimensional familiar surgiría de una entidad física real en la teoría M/de cuerdas, una tres-brana, y no a partir de una idea vaga o abstracta. En esta aproximación, la realidad de nuestro espaciotiempo tetradimensional estaría al nivel de la realidad de un electrón o un quark. (Por supuesto, usted podría seguir preguntando si el espaciotiempo más grande dentro del cual existen cuerdas y branas —las once dimensiones de la teoría M/de cuerdas— es en sí mismo una entidad; no obstante, la realidad del escenario espaciotemporal que experimentamos directamente se haría obvia.) Pero si el universo del que somos conscientes es realmente una tres-brana, ¿no revelaría una mirada siquiera informal que estamos inmersos dentro de algo —dentro de la tres-brana interior?

Bien, ya hemos visto varias cosas dentro de las cuales la física moderna sugiere que podemos estar inmersos —un océano de Higgs; espacio lleno de energía oscura; miríadas de fluctuaciones de campo— aunque ninguna de ellas se hace directamente manifiesta para las percepciones humanas desnudas. De modo que no supondría una conmoción aprender que la teoría M/de cuerdas añade otro candidato a la lista de cosas invisibles que pueden llenar el

espacio «vacío». Pero no vayamos tan rápido. Para cada una de las posibilidades anteriores, entendemos su impacto sobre la física y sabemos cómo podríamos establecer que existe verdaderamente. De hecho, hemos visto que para dos de las tres —energía oscura y fluctuaciones cuánticas— ya se ha recogido fuerte evidencia en apoyo de su existencia; y se están buscando pruebas en apoyo del campo de Higgs en los acelerados actuales y futuros. De modo que ¿cuál es la situación correspondiente para la vida dentro de una tres-brana? Si el escenario es correcto, ¿por qué no vemos la tres-brana y cómo estableceríamos que existe?

La respuesta subraya cómo las implicaciones físicas de la teoría M/de cuerdas en el contexto mundobrana difieren radicalmente de los anteriores escenarios «libres de branas» (o, como se les denomina a veces, sin branas). Consideremos, como un ejemplo importante, el movimiento de la luz —el movimiento de los fotones—. En la teoría de cuerdas, un fotón, como usted sabe ahora, es una pauta vibracional de cuerda particular. Más específicamente, los estudios matemáticos han demostrado que en el escenario mundobrana sólo las vibraciones de cuerdas abiertas, no las cerradas, producen fotones, y esto supone una gran diferencia. Los puntos extremos de cuerdas abiertas están restringidos a moverse dentro de la tres-brana, pero por lo demás son completamente libres. Esto implica que los fotones (cuerdas abiertas que ejecutan el modo de vibración fotónico) viajarían sin ninguna ligadura u obstrucción a través de nuestra tres-brana. Y eso haría que la brana parezca *completamente transparente —completamente invisible—* impidiéndonos así ver que estamos inmersos dentro de ella.

De la misma importancia, puesto que los puntos extremos de las cuerdas abiertas no pueden dejar una

brana, son incapaces de entrar en las dimensiones extras. De la misma forma que el alambre restringe a sus cuentas y el billar eléctrico restringe a sus bolas, nuestra tres-brana adhesiva permitiría que los fotones se muevan sólo dentro de nuestras tres dimensiones espaciales. Puesto que los fotones son las partículas mensajeras del electromagnetismo, esto implica que la fuerza electromagnética, la luz, estaría atrapada dentro de nuestras tres dimensiones, cómo se ilustra (en dos dimensiones para poder dibujarlo) en la figura 13.3.

Esta es una gran idea con consecuencias importantes. Antes requeríamos que las dimensiones extras de la teoría de cuerdas M estén fuertemente enrolladas. La razón, por supuesto, es que no vemos las dimensiones extras y por eso deben estar ocultas. Y una manera de ocultarlas es hacerlas más pequeñas de lo que nosotros o nuestros aparatos podemos detectar. Pero reexaminemos ahora esta cuestión en el escenario mundobrana. ¿Cómo detectamos las cosas? Bien, cuando utilizamos nuestros ojos, utilizamos la fuerza electromagnética; cuando utilizamos instrumentos potentes como microscopios electrónicos, también utilizamos la fuerza electromagnética; cuando utilizamos co- lisionadores de átomos, una de las fuerzas que utilizamos para sondear lo ultrapequeño es, una vez más, la fuerza electromagnética. Pero

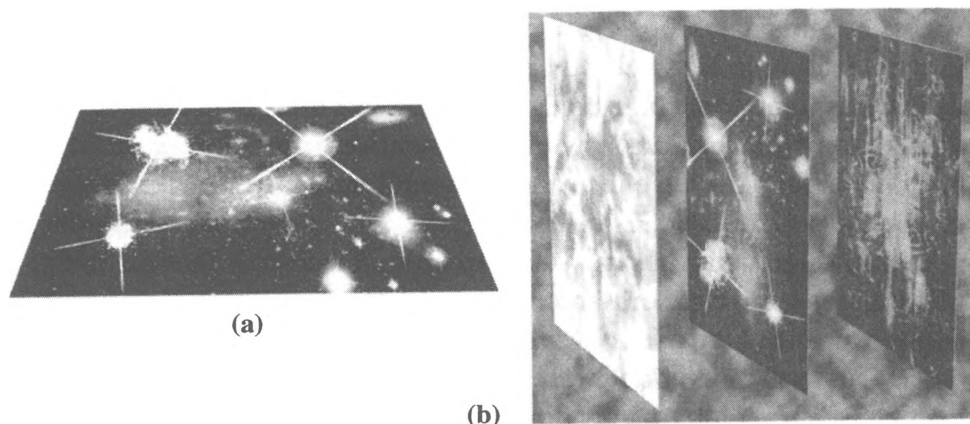


FIGURA 13.3. (a) En el escenario mundobrana, los fotones son cuerdas abiertas con puntos extremos atrapados dentro de la brana, de modo que ellos —la luz— no pueden dejar la propia brana. **(b)** Nuestro mundobrana podría estar flotando en una gran extensión de dimensiones adicionales que permanece invisible para nosotros, porque la luz que vemos no puede dejar nuestra brana. También podría haber otros mundobranas flotando próximos.

si la fuerza electromagnética está confinada en nuestra tres-brana, en nuestras tres dimensiones espaciales, es *incapaz* de sondear las dimensiones extras, independientemente de su tamaño. Los fotones no pueden escapar de nuestras dimensiones, entrar en las dimensiones extras y luego viajar de nuevo hasta nuestros ojos o aparatos permitiéndonos detectar las dimensiones extras, incluso si éstas fueran tan grandes como las dimensiones espaciales familiares.

Así, si vivimos en una tres-brana hay una explicación alternativa a por qué no somos conscientes de las dimensiones extras. No se trata de que necesariamente las dimensiones extras sean extraordinariamente pequeñas. Podrían ser grandes. No las vemos debido a la forma en que vemos. Vemos utilizando la fuerza electromagnética, que es incapaz de acceder a cualquier dimensión más allá de las

tres que conocemos. Como una hormiga que camina a lo largo de un capullo de lirio, completamente inconsciente de las aguas profundas que hay por debajo de la superficie visible, nosotros podíamos estar flotando dentro de un espacio grande y extenso de dimensiones más altas, como en la figura 13.3b, pero la fuerza electromagnética —eternamente atrapada dentro de nuestras dimensiones— sería incapaz de revelarlo.

Muy bien, podría decir usted, pero la fuerza electromagnética es sólo una de las cuatro fuerzas de la Naturaleza. ¿Qué pasa con las otras tres? ¿Pueden ellas sondear las dimensiones extras, permitiéndonos revelar su existencia? Para las fuerzas nucleares fuerte y débil la respuesta es de nuevo no. En el escenario mundobrana, los cálculos muestran que las partículas mensajeras de dichas fuerzas —los gluo- nes y las partículas W y Z— surgen también de pautas vibracionales de cuerdas abiertas, de modo que están tan atrapadas como los fotones, y los procesos que implican a las fuerzas nucleares fuerte y débil son igualmente ciegos a las dimensiones extras. Lo mismo es válido para las partículas de materia. Electrones, quarks y todas las demás especies de partículas aparecen también a partir de las vibraciones de cuerdas abiertas con puntos extremos atrapados. *Así pues, en el escenario mundobrana, usted y yo y todo lo que hemos visto estamos permanentemente prisioneros dentro de nuestra tres-brana.* Teniendo en cuenta el tiempo, todo está atrapado dentro de nuestra rebanada tetradimensional de espaciotiempo.

Bueno, casi todo. Para la fuerza de la gravedad, la situación es diferente. Análisis matemáticos del escenario mundobrana han mostrado que los gravitones surgen de la pauta vibracional de cuerdas cerradas, como lo hacen en los escenarios sin branas discutidos previamente. Y las cuerdas cerradas —cuerdas sin puntos extremos— no están

atrapadas por branas. Son tan libres de dejar una brana como lo son de entrar en ella o atravesarla. Así, si estuviéramos viviendo en una brana, no estaríamos completamente aislados de las dimensiones extras. A través de la fuerza gravitatoria podríamos influir y ser influidos por las dimensiones extras. La gravedad, en un escenario semejante, proporcionaría nuestro único medio para interaccionar más allá de nuestras tres dimensiones espaciales.

¿Qué tamaño podrían tener las dimensiones extras antes de que llegáramos a ser conscientes de ellas a través de la fuerza gravitatoria? Ésta es una pregunta interesante y crítica, así que echemos un vistazo.

La gravedad y las dimensiones extras, grandes

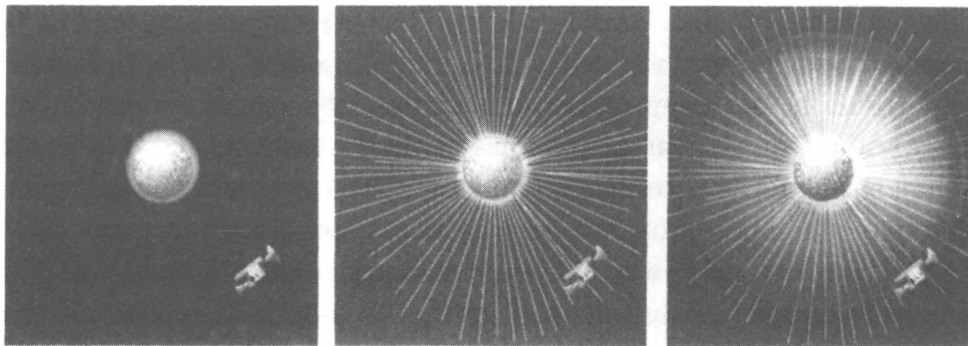
Volviendo a 1687, cuando Newton propuso su ley de la gravitación universal estaba haciendo realmente una fuerte afirmación sobre el número de dimensiones espaciales. Newton no decía simplemente que la fuerza de atracción entre dos objetos se hace más débil a medida que la distancia entre ellos se agranda. Propuso una fórmula, la ley de la inversa del cuadrado, que describe exactamente cómo disminuirá la atracción gravitatoria a medida que se separen dos objetos. Según esta fórmula, si usted duplica la distancia entre los objetos, su atracción gravitatoria se reducirá en un factor de 4 (2^2); si triplica la distancia, se reducirá en un factor de 9 (3^2); si cuadruplica la distancia, se reducirá en un factor de 16 (4^2), y con más generalidad, la fuerza gravitatoria disminuye en proporción al cuadrado de la separación. Como se ha hecho evidente durante los últimos centenares de años, esta fórmula funciona.

Pero ¿por qué la fuerza depende del cuadrado de la distancia? ¿Por qué la fuerza no disminuye como el cubo de la separación (de manera que si usted duplica la distancia, la fuerza se reduce en un factor 8) o de la cuarta potencia (de manera que si usted duplica la distancia, la fuerza se reduce en un factor 16), o quizá, incluso más simplemente, por qué la fuerza gravitatoria entre dos objetos no disminuye en proporción directa a la separación (de modo que si usted duplica la distancia, la fuerza se reduce en un factor 2)? La respuesta está ligada directamente al número de dimensiones del espacio.

Una manera de verlo es pensar en cómo depende el número de gravitones emitidos y absorbidos por los dos objetos de la separación entre éstos, o pensar en cómo disminuye la curvatura del espaciotiempo que cada objeto experimenta a medida que aumenta la distancia entre ellos. Pero sigamos una aproximación más simple, y más a la antigua usanza, que nos lleva rápida e intuitivamente a la respuesta correcta. Dibujemos una figura (figura 13.4a) que ilustra esquemáticamente el campo gravitatorio producido por un objeto masivo —digamos el Sol— de forma parecida a como la figura 3.1 ilustra esquemáticamente el campo magnético producido por una barra magnética. Aunque las líneas de campo magnético van del polo norte del imán a su polo sur, note que las líneas de campo gravitatorio emanan radialmente hacia afuera en todas las direcciones y siguen este curso. La intensidad del tirón gravitatorio que sentiría otro objeto —imagine que es un satélite en órbita— a una distancia dada es proporcional a la densidad de líneas de campo en ese lugar. Cuanto más líneas de campo atraviesan el satélite, como en la figura 13.4b, mayor es el tirón gravitatorio al que está sometido.

Ahora podemos explicar el origen de la ley de la inversa del cuadrado de Newton. Una esfera imaginaria centrada en

el Sol y que pasa por la posición del satélite, como en la figura 13.4c, tiene un área que —como la superficie de cualquier esfera en el espacio tridimensional— es proporcional al *cuadrado* de su radio, que en este caso es el *cuadrado* de la distancia entre el Sol y el satélite. Esto significa que la densidad de las líneas de campo que atraviesan la esfera —el número total de líneas de campo dividido por el área de la esfera— disminuye como el cuadrado de la separación Sol-satélite. Si usted duplica la distancia, el mismo número de líneas de campo están ahora uniformemente repartidas sobre una esfera con un área cuatro veces mayor, y por eso el tirón gravitatorio a esa distancia se reducirá en un factor de



(a)(b)(c)

FIGURA 13.4. **(a)** La fuerza gravitatoria ejercida por Sol sobre un objeto, tal como un satélite, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. La razón es que las líneas del campo gravitatorio del Sol se esparcen uniformemente como (b) y por ello tienen una densidad a una distancia *d* que es inversamente proporcional al área de una esfera imaginaria de radio *d* —esquemáticamente dibujada en **(c)—** un área que la geometría elemental muestra que es proporcional a d^2.

cuatro. La ley de la inversa del cuadrado de Newton para la gravedad es así reflejo de una propiedad geométrica de las esferas en tres dimensiones espaciales.

Por el contrario, si el universo tuviera dos e incluso sólo una dimensión espacial, ¿cómo cambiaría la fórmula de Newton? Bien, la figura 13.5a muestra una versión bidimensional del Sol y su satélite en órbita. Como usted puede ver, a cualquier distancia dada las líneas del campo gravitatorio del Sol se reparten uniformemente sobre un círculo, el análogo a una esfera en una dimensión menor. Puesto que la circunferencia del círculo es proporcional a su radio (no al cuadrado de su radio), si usted duplica la separación Sol-satélite la densidad de líneas de campo se reducirá en un factor de 2 (no 4) y por eso la intensidad del tirón gravitatorio del Sol disminuiría sólo en un factor de 2 (no 4). Si el universo tuviera solamente dos dimensiones espaciales, el tirón gravitatorio sería inversamente proporcional a la separación, no al cuadrado de la separación.

Si el universo tuviera solamente una dimensión espacial, como en la figura 13.5b, la ley de la gravedad sería aún más simple. Las lí-

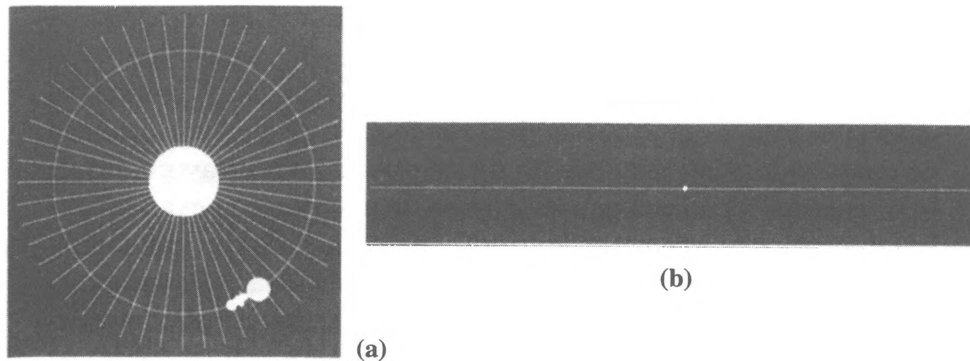


FIGURA 13.5. (a) En un universo con sólo dos dimensiones espaciales, la fuerza de gravedad decrece en proporción a la separación, porque las líneas del campo gravitatorio se esparcen uniformemente sobre un círculo cuya circunferencia es proporcional a su radio, (b) En un universo con una dimensión espacial, las líneas del campo gravitatorio no tienen lugar para esparcirse, de modo que la fuerza gravitatoria es constante, independientemente de la separación.

neas de campo gravitatorio no tendrían lugar para expandirse, y por eso la fuerza de la gravedad no decrecería con la separación. Si usted duplicara la distancia entre el Sol y el satélite (suponiendo que pudieran existir versiones de tales objetos en un universo semejante), el mismo número de líneas de campo penetraría en el satélite y con ello la fuerza de gravedad que actúa entre ellos no cambiaría en absoluto.

Aunque es imposible dibujarla, la pauta ilustrada por las figuras 13.4 y 13.5 se extiende directamente a un universo con cuatro o cinco o seis o cualquier número de dimensiones espaciales. Cuantas más dimensiones hay, más lugar tienen para esparcirse las líneas de fuerza gravitatorias. Y cuanto más se esparcen, más rápidamente disminuye la fuerza de la gravedad a medida que aumenta la separación. En cuatro dimensiones espaciales, la ley de Newton sería una ley de la inversa del cubo (si se duplica la separación, la fuerza se reduce en un factor 8); en cinco

dimensiones espaciales, sería una ley de la inversa de la cuarta potencia (si se duplica la separación, la fuerza se reduce en un factor 16); en seis dimensiones espaciales, sería una ley de la inversa de la quinta potencia (si se duplica la separación, la fuerza se reduce en un factor 32); y así sucesivamente para universos de dimensión cada vez más alta.

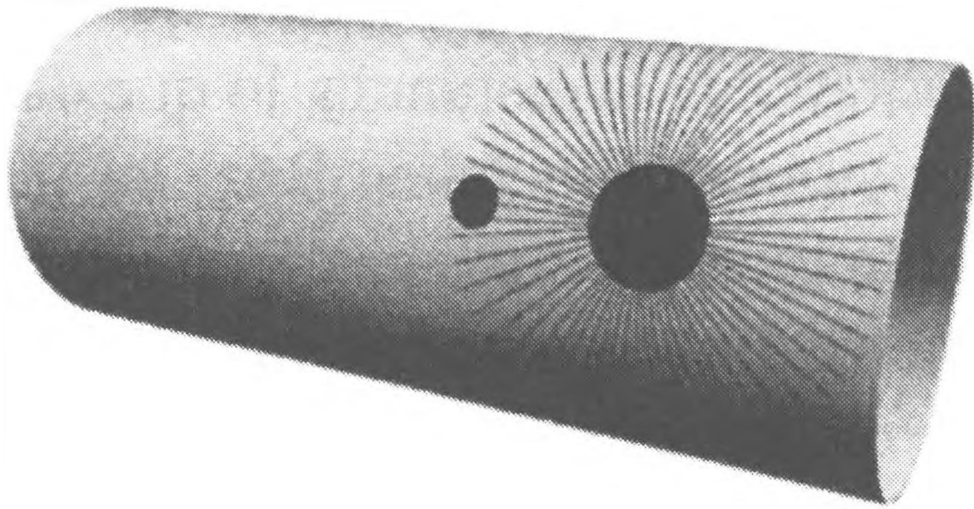
Usted podría pensar que los éxitos de la versión de la inversa del cuadrado de la ley de Newton en la explicación de una gran cantidad de datos —desde el movimiento de los planetas a las trayectorias de los cometas— confirma que vivimos en un universo con exactamente tres dimensiones espaciales. Pero esa conclusión sería precipitada. Sabemos que la ley de la inversa del cuadrado funciona a distancias astronómicas,[13.6] y sabemos que funciona en escalas terrestres, y que encaja con el hecho de que en tales escalas vemos tres dimensiones espaciales. Pero ¿sabemos que trabaja a escalas más pequeñas? ¿Hasta qué nivel en el microcosmos se ha comprobado la ley de la inversa del cuadrado para la gravedad? Los experimentadores la han confirmado hasta sólo una décima de milímetro; si dos objetos se acercan hasta una separación menor de una décima de milímetro, los datos verifican que la intensidad de su atracción gravitatoria sigue las predicciones de la ley de la inversa del cuadrado. Pero hasta ahora ha sido un importante desafío técnico poner a prueba la ley de la inversa del cuadrado en escalas más cortas (los efectos cuánticos y la debilidad de la gravedad complican el experimento). Ésta es una cuestión crítica, porque las desviaciones de la ley de la inversa del cuadrado serían una señal convincente de dimensiones extras.

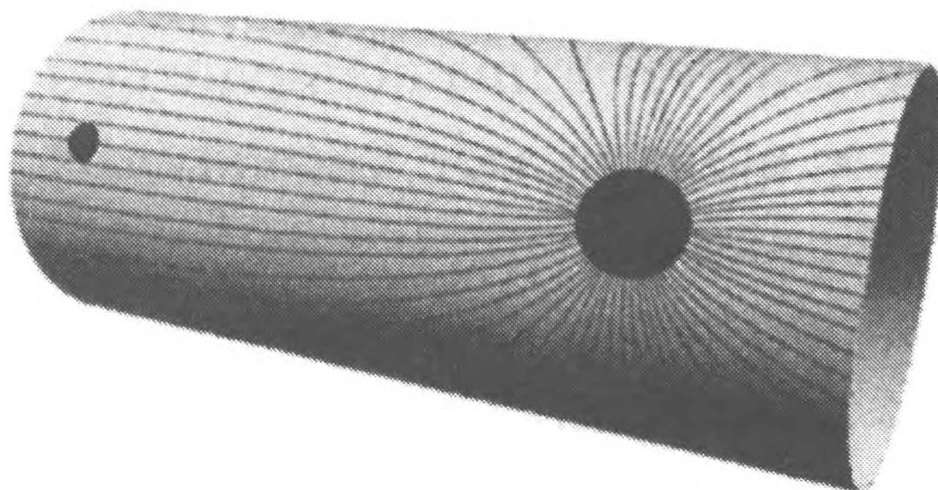
Para ver esto explícitamente, trabajemos con un ejemplo de juguete con dimensión más baja que podemos dibujar y analizar fácilmente. Imagine que vivimos en un universo con

una dimensión espacial —o que así lo pensamos, porque sólo una dimensión espacial era visible y, además, siglos de experimentos han mostrado que la fuerza de la gravedad no varía con la separación entre los objetos—. Pero imagine también que en todos esos años los experimentadores habían sido capaces de poner a prueba la ley de la gravedad sólo hasta distancias de aproximadamente una décima de milímetro. Para distancias más cortas que ésa, no había ningún dato. Ahora, imagine además que, desconocida para todos salvo para un puñado de físicos teóricos, el universo tenía realmente una segunda dimensión espacial enrollada que hace su forma como la superficie de la cuerda de Philippe Petit, como en la figura 12.5. ¿Cómo afectaría esto a test futuros y más refinados de la gravitación? Podemos deducir la respuesta mirando la figura 13.6. Cuando dos objetos minúsculos se aproximan lo suficiente —mucho más próximos que la circunferencia de la dimensión enrollada— el carácter bidimensional del espacio se haría evidente inmediatamente, porque en estas escalas las líneas de campo gravitatorio *tendrían* lugar para esparcirse (figura 13.6a). Más que ser independiente de la distancia, la fuerza de la gravedad variaría inversamente con la separación cuando los objetos estuvieran suficientemente próximos.

Así pues, si usted fuera un experimentador en este universo, y desarrollara métodos exquisitamente precisos para medir la atracción gravitatoria, esto es lo que usted encontraría. Cuando dos objetos estuvieran extraordinariamente próximos, mucho más próximos que el tamaño de la dimensión enrollada, su atracción gravitatoria disminuiría en proporción a su separación, igual que esperaría en un universo con dos dimensiones espaciales. Pero luego, cuando los objetos estuvieran tan alejados como la circunferencia de la dimensión enrollada, las cosas

cambiarían. Más allá de esta distancia, las líneas de campo gravitatorio no podrían esparcirse más. Se habrían esparcido todo lo que podían en la segunda dimensión enrollada —habrían saturado esa dimensión— y así a partir de esta distancia en adelante la fuerza gravitatoria ya no disminuiría más, como se ilustra en la figura 13.6b. Usted puede comparar esta saturación como la fontanería en una casa vieja. Si alguien abre el grifo de la cocina cuando usted está a punto de





(a)(b)

FIGURA 13.6. **(a)** Cuando los objetos están próximos, la atracción gravitatoria varía como lo hace en dos dimensiones espaciales, **(b)** Cuando los objetos están más alejados, la atracción gravitatoria se comporta como lo hace en una dimensión espacial: es constante.

ponerse el champú en su cabello, la presión del agua puede disminuir porque el agua se reparte entre los dos grifos. La presión disminuirá de nuevo si alguien abriera el grifo del lavadero, puesto que el agua se repartiría aún más. Pero una vez que todos los grifos de la casa están abiertos, la presión permanecerá constante. Aunque quizá no proporcionará la experiencia relajante del agua a alta presión que usted había previsto, la presión en la ducha no disminuiría más una vez que el agua se ha repartido completamente por todos los grifos «extras». Análogamente, una vez que el campo gravitatorio se ha repartido por completo por la dimensión curvada extra, ya no disminuirá con la separación.

A partir de sus datos usted deduciría dos cosas. Primero, del hecho de que la fuerza gravitatoria disminuía en

proporción a la distancia cuando los objetos están muy próximos, usted habría concluido que el universo tiene dos dimensiones espaciales, no una. Segundo, del hecho de que a partir de un cierto punto la fuerza gravitatoria es constante —el resultado conocido por cientos de años de experimentos anteriores— usted habría concluido que una de estas dimensiones está enrollada, con un tamaño aproximadamente igual a la distancia a partir de la cual se da este valor constante. Y con este resultado, usted habría dado la vuelta a siglos, si no milenios, de creencia con respecto a algo tan básico, el número de dimensiones del espacio, que parecía casi más allá de cualquier duda.

Aunque he contado esta historia en un universo de dimensión más baja, por facilidad de visualización, nuestra situación podría ser la misma. Centenares de años de experimentos han confirmado que la gravedad varía inversamente con el cuadrado de la distancia, lo que da fuerte evidencia de que hay tres dimensiones espaciales. Pero hasta 1998 ningún experimento había sondeado la intensidad de la gravedad a separaciones menores que un milímetro (hoy, como se mencionó, esto se ha acortado hasta una décima de milímetro). Esto llevó a Savas Dimopoulos, de Standford, Nima Arkani-Hamed, ahora en Harvard, y Gia Dvali, de la Universidad de Nueva York a proponer que *en el escenario mundobrana las dimensiones extras podrían ser tan grandes como un milímetro y todavía no habrían sido detectadas.* Esta sugerencia radical inspiró a varios grupos experimentales a iniciar un estudio de la gravedad a distancias submilimétricas con la esperanza de encontrar violaciones de la ley de la inversa del cuadrado; hasta ahora no se ha encontrado ninguna, hasta una décima de milímetro. Así pues, incluso con los experimentos sobre gravedad hoy disponibles, *si estamos viviendo dentro de una tres-brana, las dimensiones extras podrían ser tan*

grandes como una décima de milímetro, y todavía no lo sabríamos.

Ésta es una de las ideas más sorprendentes de la última década. Utilizando las tres fuerzas no gravitatorias podemos sondear hasta aproximadamente una trillonésima (10“'^{8}) de metro, y nadie ha encontrado ninguna evidencia de dimensiones extras. Pero en el escenario mundobrana, las fuerzas no gravitatorias son impotentes en la búsqueda de dimensiones extras puesto que están atrapadas en la propia brana. Sólo la gravedad puede dar idea de la naturaleza de las dimensiones extras y, hoy por hoy, las dimensiones extras podrían ser tan gruesas como un cabello humano y pese a todo habrían sido completamente invisibles para nuestros instrumentos más sofisticados. Precisamente ahora, precisamente cerca de usted, precisamente cerca de mí, y precisamente cerca de cualquier otro podría haber otra dimensión espacial —una dimensión más allá de izquierda/derecha, delante/detrás y arriba/abajo, una dimensión que está enrollada pero todavía es suficientemente grande para tragar algo tan grueso como esta página— que permanece más allá de nuestro alcance. **[*39]**

Dimensiones extras, grandes y cuerdas grandes

Al atrapar tres de las cuatro fuerzas, el escenario mundobrana relaja significativamente las ligaduras experimentales al tamaño que pueden tener las dimensiones extras, pero las dimensiones extras no son la única cosa que esta aproximación permite que se haga más grande. Basándose en ideas de Witten, Joe Lykken, Constantin Bachas y otros, Ig- natíos Antoniadis, junto con Arkani-Hamed, Dimopoulos y Dvali, se dio cuenta de que en

el escenario mundobrana incluso desexcitado, cuerdas de baja energía pueden ser *mucho* mayores que lo que se pensaba previamente. De hecho, las dos escalas —el tamaño de las dimensiones extras y el tamaño de las cuerdas— están íntimamente relacionadas.

Recordemos del capítulo anterior que el tamaño básico de una cuerda está determinado al requerir que su pauta vibracional de gravitón comunique una fuerza gravitatoria de la intensidad observada. La debilidad de la gravedad se traduce en que las cuerdas sean muy cortas, aproximadamente de la longitud de Planck (10^{33} centímetros). Pero esta conclusión depende fuertemente del tamaño de las dimensiones extras. La razón es que en la teoría M/de cuerdas, la intensidad de la fuerza gravitatoria que observamos en nuestras tres dimensiones extendidas representa un equilibrio entre dos factores. Un factor es la intensidad fundamental intrínseca de la fuerza gravitatoria. El segundo factor es el tamaño de las dimensiones extras. Cuanto más grandes son las dimensiones extras, más se puede repartir la gravedad en ellas y más débil parecerá su fuerza en las dimensiones familiares. De la misma forma que tuberías más grandes dan una presión de agua más débil porque permiten que el agua tenga más espacio para esparcirse, las dimensiones extras más grandes dan una gravedad más débil, porque dan a la gravedad más lugar para esparcirse.

Los cálculos originales que determinaban la longitud de las cuerdas suponían que las dimensiones extras eran tan minúsculas, del orden de la longitud de Planck, que la gravedad no podía entrar en ellas. Bajo esta hipótesis, la gravedad aparece débil porque es débil. Pero ahora, si trabajamos en el escenario mundobrana y permitimos que las dimensiones extras sean mucho más grandes que lo que se había considerado previamente, la debilidad observada

de la gravedad ya no significa que sea intrínsecamente débil. En su lugar, la gravedad podría ser una fuerza relativamente poderosa que parece débil sólo porque las dimensiones extras relativamente grandes, como las tuberías grandes, diluyen su intensidad intrínseca. Siguiendo esta línea de razonamiento, si la gravedad es mucho más fuerte que lo que en un tiempo se pensó, las cuerdas también pueden ser mucho más largas que lo que un tiempo se pensó.

Hoy por hoy, la pregunta de exactamente cómo de largas no tiene una respuesta única y definida. Con la libertad recién encontrada para variar el tamaño de las cuerdas y el tamaño de las dimensiones extras en un rango mucho más amplio que el que se imaginaba previamente, hay varias posibilidades. Dimopoulos y sus colaboradores han argumentado que los resultados experimentales existentes, procedentes tanto de la física de partículas como de la astrofísica, muestran que las cuerdas desexcitadas no pueden ser mayores que aproximadamente una trillonésima ($10^{“18}$) de metro. Aunque pequeño para los patrones cotidianos, esto es casi cien mil billones (10^{17}) de veces mayor que la longitud de Planck *—casi cien mil billones de veces mayor que lo que previamente se pensaba—.* Como veremos ahora, eso sería suficientemente grande para que señales de cuerdas pudieran ser detectadas por la próxima generación de aceleradores de partículas.

¿Resiste frente al experimento la teoría de cuerdas?

La posibilidad de que estemos viviendo dentro de una gran tres-brana es, por supuesto, sólo una posibilidad. Y, dentro del escenario mundobrana, la posibilidad de que las dimensiones extras pudieran ser mucho mayores que lo que

un tiempo se pensó —y la posibilidad relacionada de que también las cuerdas pudieran ser mucho mayores de lo que en un tiempo se pensó— son también sólo eso: posibilidades. *Pero son posibilidades tremendamente excitantes.* Cierto es que, incluso si el escenario mundobrana es correcto, las dimensiones extras y el tamaño de las cuerdas podrían ser todavía planckianos. Pero la posibilidad dentro de la teoría M/de cuerdas de que las cuerdas y las dimensiones extras sean mucho más grandes —de estar apenas más allá del alcance de la tecnología actual— es fantástica. Significa que hay al menos una oportunidad de que en los años venideros la teoría M/de cuerdas entre en contacto con la física observable y se convierta en una ciencia experimental.

¿Con qué probabilidad? Yo no lo sé, ni ningún otro lo sabe. Mi intuición me dice que es poco probable, pero mi intuición está conformada por una década y media de trabajo dentro del marco convencional de cuerdas de tamaño de Planck y dimensiones extras de tamaño de Planck. Quizá mi instinto está pasado de moda. Afortunadamente, la cuestión será establecida sin que sea afectada en lo más mínimo por la intuición de alguien. Si las cuerdas son grandes, o si alguna de las dimensiones extras es grande, las implicaciones para los experimentos venideros son espectaculares.

En el próximo capítulo consideraremos varios experimentos que pondrán a prueba, entre otras cosas, las posibilidades de cuerdas relativamente grandes y dimensiones extras, grandes, así que aquí sólo voy a abrirle el apetito. Si las cuerdas son tan grandes como una trillonésima (1()“^{18}) de metro, las partículas correspondientes a las vibraciones de armónicos superiores en la figura 12.4, no tendrán masas enormes, muy por encima de la masa de Planck, como en el escenario

estándar. En su lugar, sus masas serán sólo de un millar o algunos miles de veces la de un protón, y eso es suficientemente bajo para estar dentro del alcance del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) que ahora se está construyendo en el CERN. Si estas vibraciones de cuerdas fueran excitadas mediante colisiones de alta energía, los detectores de los aceleradores lucirían como la bola de cristal de Times Squa- re en Año Nuevo. Se produciría todo un montón de partículas nunca antes vistas, y sus masas estarían relacionadas mutuamente de forma parecida a como están los diversos armónicos en un violonchelo. La firma de la teoría de cuerdas estaría grabada en los datos con un detalle que hubiera impresionado a John Hancock. [*40] Los investigadores no podrían pasarla por alto, ni siquiera sin sus gafas.

Además, en el escenario mundobrana, las colisiones de alta energía podrían producir incluso agujeros negros en miniatura. Aunque normalmente pensamos en los agujeros negros como estructuras gigantescas en el espacio profundo, desde los primeros días de la relatividad general se ha sabido que si usted acumula suficiente materia en la palma de la mano, crearía un minúsculo agujero negro. Esto no sucede porque nadie —ni ningún dispositivo mecánico— tiene un agarre siquiera remotamente fuerte para ejercer una fuerza de compresión suficiente. En su lugar, el único mecanismo aceptado para la producción de agujeros negros implica la atracción gravitatoria de una estrella enormemente masiva que supera a la presión hacia afuera normalmente ejercida por los procesos de fusión nuclear dentro de la estrella, lo que hace que la estrella colapse sobre sí misma. Pero si la intensidad intrínseca de la gravedad en escalas pequeñas es mucho mayor que lo que antes se pensaba, se podrían producir minúsculos agujeros negros con una fuerza de compresión significativamente

menor que lo que antes se creía. Los cálculos muestran que el Gran Colisionador de Hadrones puede tener la potencia de compresión suficiente para crear una cornucopia de agujeros negros microscópicos mediante colisiones de alta energía entre protones.[13.7] Piense en lo sorprendente que sería. El Gran Colisionador de Hadrones podría resultar una factoría para producir agujeros negros microscópicos. Estos agujeros negros serían tan pequeños y durarían un tiempo tan corto que no nos plantearían la más mínima amenaza (hace años Stephen Hawking demostró que todos los agujeros negros se desintegran vía procesos cuánticos —los grandes muy lentamente, los minúsculos muy rápidamente —), pero su producción ofrecería una confirmación de una de las ideas más exóticas nunca contempladas.

Cosmología de mundobranas

Un objetivo primordial de la investigación actual, uno que está siendo perseguido ardientemente por científicos en todo el mundo (yo incluido), es formular una comprensión de la cosmología que incorpore las nuevas ideas de la teoría M/de cuerdas. La razón es evidente: la cosmología no sólo trata de resolver cuestiones grandes que se atragantan, y tampoco se trata simplemente de llegar a entender qué aspectos de la experiencia familiar —tales como la flecha del tiempo— están ligados a condiciones en el nacimiento del universo; la cosmología también ofrece a un teórico lo que Nueva York proporcionó a Sinatra: un terreno de prueba por excelencia. Si una teoría puede funcionar en las condiciones extremas características de los primeros momentos del universo, puede hacerlo en cualquier parte.

Hoy por hoy, la cosmología según la teoría M/de cuerdas es un trabajo en curso, con investigadores que siguen dos

senderos principales. La primera aproximación, y la más convencional, imagina que de la misma forma que la inflación proporcionó un frente mínimo pero profundo a la teoría del *big bang* estándar, la teoría M/de cuerdas proporciona un frente aún anterior y quizá aún más profundo para la inflación. La idea es que la teoría M/de cuerdas aclarará la región borrosa que hemos utilizado para denotar nuestra ignorancia de los primeros momentos del universo, y después de eso, el drama cosmológico se desenvolverá de acuerdo con el guión extraordinariamente exitoso de la teoría inflacionaria, contado en capítulos anteriores.

Aunque ha habido avances sobre detalles específicos requeridos por esta visión (tales como tratar de entender por qué sólo tres de las dimensiones espaciales del universo sufrieron expansión, así como desarrollar métodos matemáticos que puedan probarse relevantes para analizar el reino aespacial/atemporal que puede preceder a la inflación), todavía no se han dado los momentos eureka. La idea es que mientras la cosmología inflacionaria imagina que el universo observable se hace cada vez más pequeño en instantes cada vez anteriores —y así es cada vez más caliente, más denso y más energéticos— la teoría M/de cuerdas domestica este comportamiento desordenado (en la jerga física, «singular») introduciendo un tamaño mínimo (como en nuestra discusión de las páginas 445-447) por debajo del cual se hacen relevantes magnitudes físicas nuevas y menos singulares. Este razonamiento yace en el corazón de la fusión satisfactoria que hace la teoría M/de cuerdas de la relatividad general y la mecánica cuántica, y muchos investigadores esperan que pronto determinaremos cómo se puede aplicar el mismo razonamiento en el contexto de la cosmología. Pero por ahora la región borrosa

sigue pareciendo borrosa, y nadie sabe cuándo se alcanzará la claridad.

La segunda aproximación utiliza el escenario mundobrana, y en su encarnación más radical postula un marco cosmológico completamente nuevo. No está ni mucho menos claro si esta aproximación sobrevivirá a un examen matemático detallado, pero proporciona un buen ejemplo de cómo los avances trascendentales en la teoría fundamental pueden sugerir nuevos caminos a través de territorios bien trillados. La propuesta se denomina el *modelo cíclico.*

Cosmología cíclica

Desde el punto de vista del tiempo, la experiencia ordinaria nos enfrenta a dos tipos de fenómenos: los que tienen un comienzo claramente delimitado (este libro, un partido de béisbol, una vida humana) y los que son cíclicos, que suceden una y otra vez (el cambio de las estaciones, la salida y puesta del Sol, las bodas de Larry King). Por supuesto, en un examen más cercano aprendemos que los fenómenos cíclicos también tienen un inicio y un final, puesto que los ciclos no continúan en general para siempre. El Sol ha estado saliendo y poniéndose —es decir, la Tierra ha estado girando sobre su eje mientras da vueltas alrededor del Sol— todos los días durante unos 5.000 millones de años. Pero antes de eso, el Sol y el sistema solar todavía tenían que formarse. Y un día, unos 5.000 millones de años a partir de ahora, el Sol se convertirá en una estrella gigante roja, engullendo a los planetas interiores, engullendo a la Tierra, y ya no habrá siquiera una noción de salida y puesta del Sol, al menos no aquí.

Pero éstos son reconocimientos científicos modernos. Para los antiguos, los fenómenos cíclicos parecían eternamente cíclicos. Y para muchos los fenómenos cíclicos, que siguen su curso y continuamente vuelven a empezar de nuevo, eran los fenómenos primordiales. Los ciclos de los días y las estaciones fijan el ritmo del trabajo y la vida, de modo que a nadie maravilla que algunas de las más antiguas cosmologías conocidas concibieran el despliegue del mundo como un proceso cíclico. Más que postular un comienzo, un centro y un final, una cosmología cíclica imagina que el mundo cambia a través del tiempo de la misma forma que la Luna cambia a través de fases. Una vez que haya recorrido una secuencia completa, las condiciones están listas para que todo empiece de nuevo e inicie otro ciclo.

Desde el descubrimiento de la relatividad general, se han propuesto varios modelos cosmológicos cíclicos; el más conocido fue desarrollado en la década de 1930 por Richard Tolman del Instituto de Tecnología de California. Tolman sugirió que la expansión observada del universo podría frenarse y detenerse algún día, y ser seguida de un período de contracción en el que el universo se hiciera cada vez más

pequeño. Pero en lugar de alcanzar un violento final en el que implo- siona sobre sí mismo y llega a su fin, el universo podría sufrir, proponía Tolman, un *rebote-,* el espacio podría contraerse hasta un tamaño pequeño y luego rebotar, iniciando un nuevo ciclo de expansión seguido una vez más de contracción. Un universo que repita eternamente este ciclo —expansión, contracción, rebote, expansión de nuevo — evitaría elegantemente las espinosas cuestiones del origen: en un escenario semejante, el concepto mismo de origen sería inaplicable, puesto que el universo siempre fue y siempre sería.

Pero Tolman se dio cuenta de que mirando hacia atrás en el tiempo desde hoy, los ciclos podrían haberse repetido durante un tiempo, pero no indefinidamente. La razón es que durante cada ciclo la segunda ley de la termodinámica dicta que la entropía crecería en promedio.**[13.8]** Y según la relatividad general, la cantidad de entropía en el comienzo de cada nuevo ciclo determina cuánto durará ese ciclo. Más entropía significa un período más largo de expansión antes de que el movimiento hacia afuera llegue a pararse y el movimiento hacia adentro tome el mando. Cada ciclo sucesivo duraría así mucho más que su predecesor; de forma equivalente, los ciclos anteriores serían cada vez más cortos. Cuando se analiza matemáticamente, el acortamiento constante de los ciclos implica que no pueden extenderse infinitamente lejos erí el pasado. Incluso en el marco cíclico de Tolman, el universo tendría un comienzo.

La propuesta de Tolman suponía un universo esférico que, como hemos visto, ha sido descartado por las observaciones. Pero recientemente se ha desarrollado una versión radicalmente nueva de la cosmología cíclica, que incluye un universo plano, dentro de la teoría M/de cuerdas. La idea procede de Paul Steinhardt y su colaborador Neil Turok de la Universidad de Cambridge (que hace uso de resultados descubiertos en sus colaboraciones con Burt Ovrut, Nathan Sei- berg y Justin Khoury) y propone un nuevo mecanismo para impulsar la evolución cósmica.**[13.9]** Dicho brevemente, ellos sugieren que estamos viviendo dentro de una tres-brana que colisiona violentamente cada pocos billones de años con otra tres-brana vecina y paralela. Y el *bang* de la colisión inicia un nuevo ciclo cosmológico.

El montaje básico de la propuesta se ilustra en la figura 13.7 y fue sugerido hace algunos años por Horava y Witten en un contexto no cosmológico. Horava y Witten estaban tratando de completar la unidad propuesta por Witten entre

las cinco teorías de cuerdas y encontraron que si una de las siete dimensiones extras en la teoría M tuviera una forma muy simple —no un círculo, como en la figura 12.7, sino un pequeño segmento de una línea recta, como en la figura 13.7— y estuviera acotada por las denominadas branas del fin-del-mundo unidas como las tapas de un libro, entonces podría establecerse una conexión directa entre la teoría de cuerdas Heterótica-E y todas las demás. Los detalles de cómo llegaron a esta conexión no son ni obvios ni esenciales para nosotros ahora (si usted está interesado, vea, por ejemplo, *El universo elegante,* capítulo 12); lo que importa aquí es que es un punto de partida que surge de forma natural de la propia teoría. Steinhardt y Turok lo tomaron para su propuesta cosmológica.

En concreto, Steinhardt y Turok imaginan que cada brana de la figura 13.7 tiene tres dimensiones espaciales, y que el segmento de línea entre ellas proporciona la cuarta dimensión espacial. Las seis dimensiones espaciales restantes están enrolladas en un espacio de Calabi-Yau (no mostrado en la figura) que tiene la forma correcta para que las pautas vibracionales de cuerdas den cuenta del tipo de partículas conocidas.**[13.10]** El universo del que somos directamente conscientes corresponde a una de estas tres-branas; si quiere, puede considerar la segunda tres-brana como otro universo cuyos habitantes, si los hay, también serían conscientes de sólo tres dimensiones espaciales, suponiendo que su tecnología y habilidad experimental no superasen enormemente a las nuestras. En este montaje, entonces, otra tres-brana —otro universo— está justo en la puerta de al lado. Está a no más de una fracción de un milímetro (estando la separación en la cuarta dimensión espacial, como en la figura 13.7), pero puesto que nuestra tres-brana es tan adhesiva y la gravedad que experimentamos tan débil, no tenemos ninguna evidencia

directa de su existencia y sus hipotéticos habitantes no tienen ninguna evidencia de la nuestra.

Pero, según el modelo cosmológico cíclico de Steinhardt y Turok, la figura 13.7 no es como ha sido siempre o como siempre será. Por el contrario, en su aproximación, las dos branas se atraen mutuamente —casi como si estuvieran conectadas por minúsculas bandas elásti-

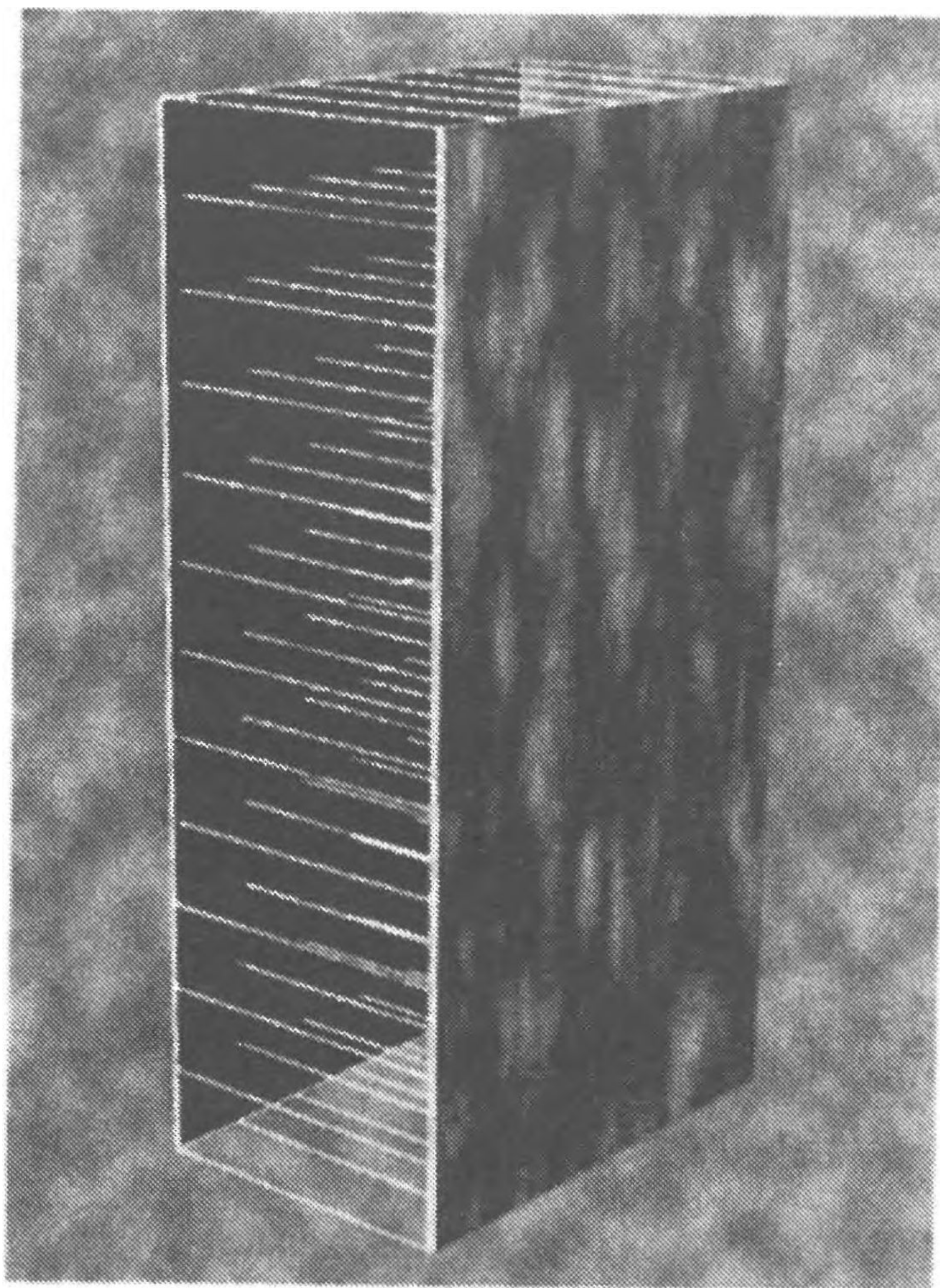


FIGURA 13.7. Dos tres-branas, separadas por un corto intervalo.

cas— y esto implica que cada una de ellas impulsa la evolución cosmológica de la otra: las branas se enzarzan en un ciclo interminable de colisión, rebote y colisión de nuevo,

regenerando eternamente sus mundos tridimensionales en expansión. Para ver cómo es esto, mire la figura 13.8, que ilustra un ciclo completo, paso a paso.

En la Fase 1, las dos tres-branas acaban de chocar, y ahora están rebotando. La tremenda energía de la colisión deposita una cantidad importante de radiación de alta temperatura y de materia en cada una de las tres-branas que rebotan, y —ésta es la clave— Steinhardt y Tu- rok argumentan que *las propiedades detalladas de esta materia y radiación tienen un perfil casi idéntico al que se produce en el modelo inflacionario.* Aunque hay todavía alguna controversia sobre este punto, Steinhardt y Turok afirman que la colisión entre las dos tres- branas da como resultado unas condiciones físicas extraordinariamente próximas a lo que habrían sido un momento antes de la ráfaga de expansión inflacionaria en la aproximación más convencional discutida en el capítulo 10. No es sorprendente entonces que para un observador hipotético dentro de nuestra tres-brana, las siguientes etapas en el modelo cosmológico cíclico sean esencialmente las mismas que las de la aproximación estándar, como se ilustra en la figura 9.2 (donde

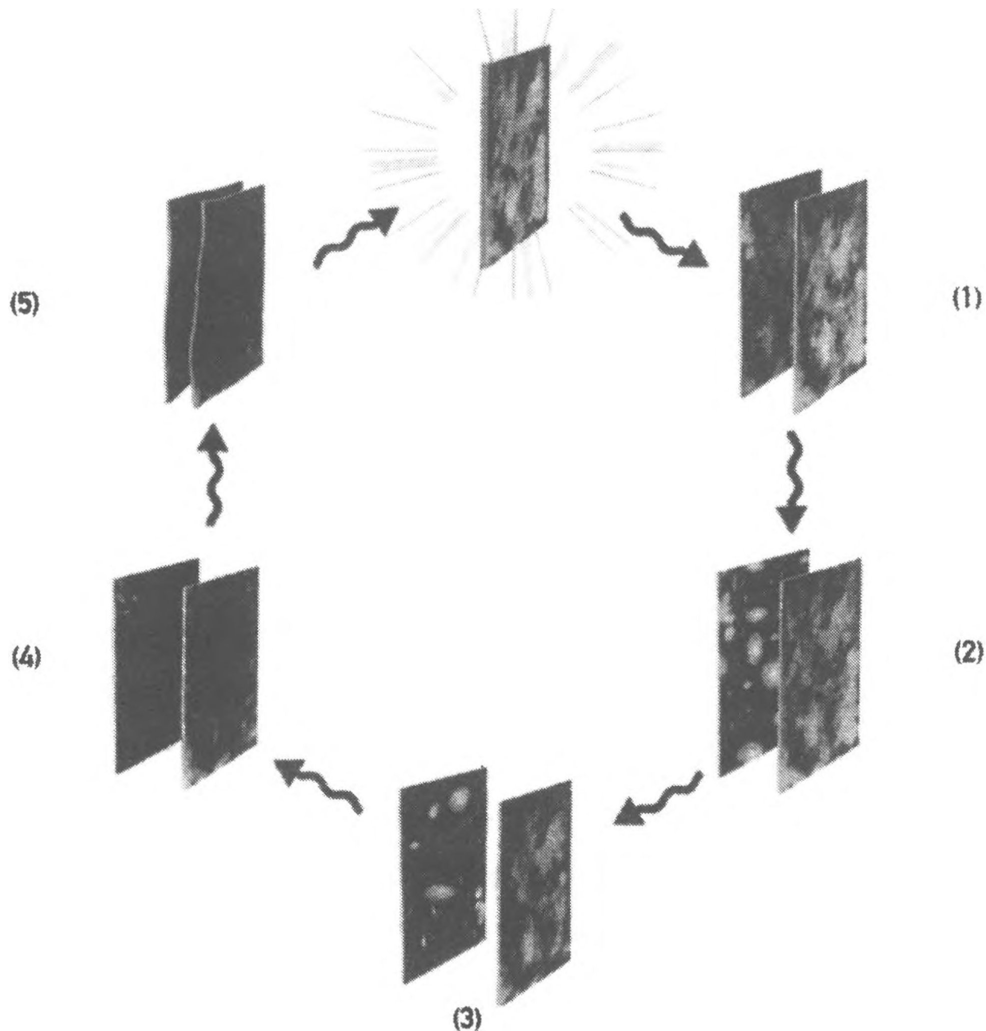


FIGURA 13.8. Varias etapas en el modelo cosmológico cíclico mundobrana.

ahora se interpreta que dicha figura representa la evolución en una de las tres-branas). A saber, cuando nuestra tres-brana rebota de la colisión, se expande y enfría, y poco a poco se forman estructuras cósmicas tales como estrellas y galaxias a partir del plasma primordial, como usted puede ver en la Fase 2. Entonces, inspirados por las recientes observaciones de supernovas discutidas en el capítulo 10, Steinhardt y Turok configuran su modelo de

modo que aproximadamente 7.000 millones de años dentro del ciclo —Fase 3— la energía en la materia y la radiación ordinaria queda suficientemente diluida por la expansión de la brana para que una componente de energía oscura gane la mano y, debido a su presión negativa, impulse una era de expansión acelerada. (Esto requiere un ajuste arbitrario de detalles, pero permite que el modelo encaje con la observación, y así, argumentan los proponentes del modelo cíclico, está bien motivado.) Unos 7.000 millones de años más tarde, nosotros los seres humanos nos encontramos aquí en la Tierra, al menos en el ciclo actual, experimentando las primeras fases de la etapa acelerada. Luego, durante aproximadamente el siguiente billón de años, no mucho nuevo sucede aparte de la expansión acelerada y continua de nuestra tres-brana. Eso es tiempo suficiente para que nuestro espacio tridimensional se haya estirado en un factor tan colosal que materia y radiación están casi completamente diluidas, dejando que el mundobrana parezca casi completamente vacío y completamente uniforme: Fase 4.

En este momento, nuestra tres-brana ha completado su rebote desde la colisión inicial y ha empezado a acercarse de nuevo a la segunda tres-brana. A medida que nos aproximamos cada vez más a otra colisión, las agitaciones cuánticas de las cuerdas ligadas a nuestra brana pueblan su vacío uniforme con minúsculos rizos, Fase 5. A medida que seguimos ganando velocidad, los rizos siguen creciendo; luego, en una colisión cataclísmica chocamos con la segunda tres-brana, rebotamos y el ciclo empieza de nuevo. Los rizos cuánticos imprimen minúsculas inhomogeneidades en la radiación y la materia producidas durante la colisión e, igual que en el escenario inflacionario, estas desviaciones de la uniformidad perfecta crecen para dar grumos que finalmente generan las estrellas y las galaxias.

Éstas son las fases principales en el modelo cíclico (también conocido como el *big splatf* Su premisa —mundobranas en colisión— es muy diferente de la teoría inflacionaria, pero hay, no obstante, significativos puntos de contacto entre las dos aproximaciones. Una similitud esencial es que ambos se basan en la agitación cuántica para generar no uniformidades iniciales. De hecho, Steinhardt y Turok argumentan que las ecuaciones que gobiernan los rizos cuánticos en el modelo cíclico son casi idénticas a las de la imagen inflacionaria, de modo que las no uniformidades resultantes predichas por las dos teorías son también casi idénticas.[13.11] Además, aunque no hay una ráfaga inflacionaria en el modelo cíclico, hay un período de un billón de años (que empieza en la Fase 3) de expansión acelerada más suave. Pero se trata simplemente de una cuestión de prisa *versus* paciencia; lo que consigue el modelo inflacionario en un flash, el modelo cíclico lo consigue en una eternidad relativa. Puesto que la colisión en el modelo cíclico no es el comienzo del universo, se permite el lujo de resolver lentamente cuestiones cosmológicas (como los problemas de la planitud y del horizonte) durante el billón de años final de cada ciclo *previo.* Eones de expansión acelerada suave pero continua al final de cada ciclo estiran nuestra tres-brana hasta hacerla plana y, excepto por minúsculas pero importantes fluctuaciones cuánticas, la hacen casi completamente uniforme. Y así, la larga etapa final de cada ciclo, seguida por el choque en el comienzo del ciclo siguiente, da un ambiente muy parecido al producido por el corto brote de expansión en la aproximación inflacionaria.

Una breve valoración

En sus niveles de desarrollo actual, tanto el modelo inflacionario como el modelo cíclico proporcionan marcos cosmológicos ingeniosos, pero ninguno de ellos ofrece una teoría completa. Ignorando las condiciones dominantes durante los primeros instantes del universo los proponentes de la cosmología inflacionaria suponen simplemente, sin justificación teórica, que se dieron las condiciones requeridas para iniciar la inflación. Si lo hicieron, la teoría resuelve numerosos enigmas cosmológicos y lanza la flecha del tiempo. Pero tales éxitos dependen de que suceda la inflación en primer lugar. Y lo que es más, la cosmología inflacionaria no ha sido introducida sin fisuras dentro de la teoría de cuerdas y por eso no es todavía parte de una fusión consistente de la mecánica cuántica y la relatividad general.

El modelo cíclico tiene su propia cuota de inconvenientes. Como sucede con el modelo de Tolman, consideraciones de crecimiento de entropía (y también de mecánica cuántica)[13.12] aseguran que los ciclos del modelo cíclico no pueden haber sucedido siempre. En su lugar, los ciclos empezaron en algún instante definido en el pasado, y así, como sucede con la inflación, necesitamos una explicación de cómo llegó a empezar el primer ciclo. Si lo hizo, entonces la teoría, también como la inflación, resuelve los problemas cosmológicos suaves y pone la flecha del tiempo apuntando desde cada choque de baja entropía en adelante a través de las fases siguientes de la figura 13.8. Pero, tal como se concibe actualmente, el modelo cíclico no ofrece ninguna explicación de cómo o por qué el universo se encuentra en la configuración necesaria de la figura 13.8. ¿Por qué, por ejemplo se enrollan seis dimensiones espaciales en una forma de Calabi-Yau particular, mientras que una de las dimensiones extras toma la forma de un segmento espacial que separa dos

tres-branas. ¿Cómo es que las dos tres-branas del fin-del-mundo se alinean tan perfectamente y se atraen mutuamente con la fuerza exacta de modo que la fases de la figura 13.8 se sucedan como hemos descrito? Y, de importancia crítica, ¿qué sucede realmente cuando las dos tres- branas colisionan en la versión de un *bang* en el modelo cíclico?

Sobre esta última pregunta existe la esperanza de que el choque en el modelo cíclico sea menos problemático que la singularidad encontrada en el tiempo cero en la cosmología inflacionaria. En lugar de estar todo el espacio infinitamente comprimido, en la aproximación cíclica sólo la única dimensión entre las branas queda comprimida; las propias branas experimentan una expansión global, no contracción, durante cada ciclo. Y esto, han argumentado Steinhardt y Turok y sus colaboradores, implica temperatura finita y densidades finitas en las propias branas. Pero ésta es una conclusión muy provisional porque, hasta ahora, nadie ha sido capaz de obtener lo máximo de las ecuaciones y calcular lo que sucedería si las branas se juntaran. De hecho, los análisis realizados hasta ahora apuntan a que el choque esté sujeto al mismo problema que aflige a la teoría inflacionaria en el tiempo cero. Las matemáticas se vienen abajo. Así pues, las cosmología sigue necesitando una solución rigurosa a su inicio singular —sea el verdadero inicio del universo o inicio de nuestro ciclo actual.

La característica más atractiva del modelo cíclico es la forma en que incorpora la energía oscura y la expansión acelerada observada. En 1998, el descubrimiento de que el universo está sufriendo una expansión acelerada supuso una completa sorpresa para físicos y astrónomos. Aunque podía ser incorporada en la imagen cosmológica inflacionaria suponiendo que el universo contiene la cantidad exacta de energía oscura, la expansión acelerada

parece un añadido caprichoso. En el modelo cíclico, por el contrario, el papel de la energía oscura es natural y central. El período de un billón de años de expansión acelerada lenta pero continua es crucial para borrar la pizarra, para diluir el universo observable hasta casi la nada, y para reiniciar las condiciones para preparar el próximo ciclo. Desde este punto de vista, tanto el modelo inflacionario como el modelo cíclico se basan en la expansión acelerada —el modelo inflacionario cerca de su inicio y el modelo cíclico al final de cada uno de sus ciclos— pero sólo el último tiene apoyo observacional directo. (Recuerde, la aproximación cíclica está diseñada de modo que acabamos de entrar en la fase de un billón de años de expansión acelerada, y tal expansión ha sido observada realmente.) Eso es un punto a favor del modelo cíclico, pero también significa que si la expansión acelerada dejara de ser confirmada por observaciones futuras, el modelo inflacionario podría sobrevivir (aunque el enigma del 70 por 100 que falta en el presupuesto de energía del universo se plantearía de nuevo) y el modelo cíclico no podría hacerlo.

Nuevas visiones del espaciotiempo

Tanto el escenario mundobrana como el modelo cosmológico cíclico que genera son altamente especulativos. Los he discutido aquí no tanto porque esté seguro de que son correctos sino porque quiero ilustrar las sorprendentes nuevas maneras de pensar acerca del espacio en el que habitamos, y la evolución que ha experimentado, que han sido inspiradas por la teoría M/de cuerdas. Si estamos viviendo dentro de una tres-brana, la vieja pregunta de siglos con respecto a la corporeidad del espacio tridimensional tendría su respuesta más definida: el

espacio sería una brana, y así sería más definitivamente un algo. También podría no ser algo particularmente especial pues podría haber muchas otras branas, de varias dimensiones, flotando dentro de la extensión de dimensiones más altas de la teoría M/de cuerdas. Y si la evolución cosmológica en nuestra tres-brana está impulsada por colisiones repetidas con una brana próxima, el tiempo como lo conocemos llenaría sólo uno de los muchos ciclos del universo, con un *big bang* seguido de otro, y luego otro.

Para mí, ésta es una idea excitante; también nos hace ser más humildes. Puede haber en el espacio y el tiempo mucho más de lo que preveíamos; si lo hay, lo que consideramos que es «todo» quizá sea tan sólo un pequeño constituyente de una realidad mucho más rica.

14

Arriba en el cielo y abajo en la Tierra

Experimentando con el espacio y el tiempo

Hemos recorrido un largo camino desde que Empédocles de Agrigento explicaba el universo utilizando tierra, aire, fuego y agua.

Y muchos de los avances que hemos hecho, desde Newton hasta los revolucionarios descubrimientos del siglo xx, han sido corroborados espectacularmente mediante la confirmación experimental de predicciones teóricas precisas y detalladas. Pero desde mediados de la década de 1980 hemos sido víctimas de nuestro propio éxito. Con el impulso incesante para llevar aún más lejos los límites del conocimiento, nuestras teorías han entrado en dominios que están fuera del alcance de nuestra tecnología actual.

No obstante, con diligencia y suerte, muchas ideas de vanguardia serán puestas a prueba durante las próximas décadas. Como discutiremos en este capítulo, experimentos planeados o en curso pueden aportar muchas ideas sobre la existencia de dimensiones extras, la composición de la materia oscura y de la energía oscura, el origen de la masa y el océano de Higgs, aspectos de la cosmología del universo primitivo, la relevancia de la supersimetría y, posiblemente, la veracidad de la propia teoría de cuerdas. Y así, con un poco más de suerte, quizá puedan ponerse a prueba finalmente algunas ideas imaginativas e

innovadoras con respecto a la unificación, la naturaleza del espacio y del tiempo y nuestros orígenes cósmicos.

Einstein disfrazado[*41]

Durante sus diez años de lucha por formular la teoría de la relatividad general, Einstein buscó inspiración en varias fuentes. Las más influyentes fueron las ideas sobre las matemáticas de las superficies curvas desarrolladas en el siglo xix por luminarias matemáticas entre las que se incluían Cari Friedrich Gauss, János Bolyai, Nikolai Lobachevsky y Georg Bemhard Riemann. Como discutimos en el capítulo 3, Einstein se inspiró también en las ideas de Ernst Mach. Recuerde que Mach defendía una concepción relacionista del espacio; para él, el espacio proporcionaba el lenguaje para especificar la localización de un objeto con respecto a otro pero no era en sí mismo una entidad independiente. Inicialmente, Einstein fue un defensor entusiasta de la perspectiva de Mach, porque era lo más parecido a lo que podía ser una teoría que aceptase la relatividad. Pero cuando Einstein llegó a una comprensión más profunda de la relatividad general, se dio cuenta de que no incorporaba plenamente las ideas de Mach. Según la relatividad general, el agua en el cubo de Newton, girando en un universo por lo demás vacío, adoptaría una forma cóncava, y esto estaba en conflicto con la perspectiva puramente relacional de Mach, puesto que implica una noción absoluta de aceleración. Incluso así, la relatividad general incorpora algunos aspectos del punto de vista de Mach, y en los próximos años un experimento que se ha estado preparando durante cerca de cuarenta años y en el que se han invertido más de quinientos millones de dólares

pondrá a prueba una de las características machianas más destacadas.

La física que se va a estudiar se conoce desde 1918, cuando los investigadores austríacos Joseph Lense y Hans Thirring utilizaron la relatividad general para mostrar que de la misma manera que un objeto masivo deforma el espacio y el tiempo —como una bola de bolos colocada sobre una cama elástica— también un objeto que rota arrastra al espacio (y el tiempo) que le rodea, como una piedra que gira sumergida en un cubo de jarabe. Esto se conoce como *arrastre de sistema* e implica, por ejemplo, que un asteroide en caída libre hacia una estrella de neutrones o un agujero negro que giran rápidamente quedará atrapado en un remolino de espacio en rotación y empezará a dar vueltas a medida que desciende. El efecto se denomina arrastre de sistema porque desde el punto de vista del asteroide —desde su sistema de referencia— no está siendo desviado en absoluto. En su lugar, está cayendo directamente a lo largo de la malla espacial, pero puesto que el espacio está arremolinado (como en la figura 14.1) la malla se retuerce, de modo que el significado de «directamente» difiere del que usted hubiera esperado desde una perspectiva lejana no arremolinada.

Para ver la conexión con Mach, piense en una versión del arrastre del sistema en la que el objeto masivo en rotación es una esfera enorme y hueca. Los cálculos iniciados en 1912 por Einstein (incluso antes de que completase la relatividad general), que fueron significativamente ampliados en 1965 por Dieter Brill, y finalmente completados en 1985 por los físicos alemanes Herbert Pfister y K. Braun, demostraban que el espacio dentro de la esfera hueca sería arrastrado por el movimiento rotacional y puesto a girar como una especie de remolino.[14.1] Si dentro de dicha esfera en rotación se colocara un cubo en repo-

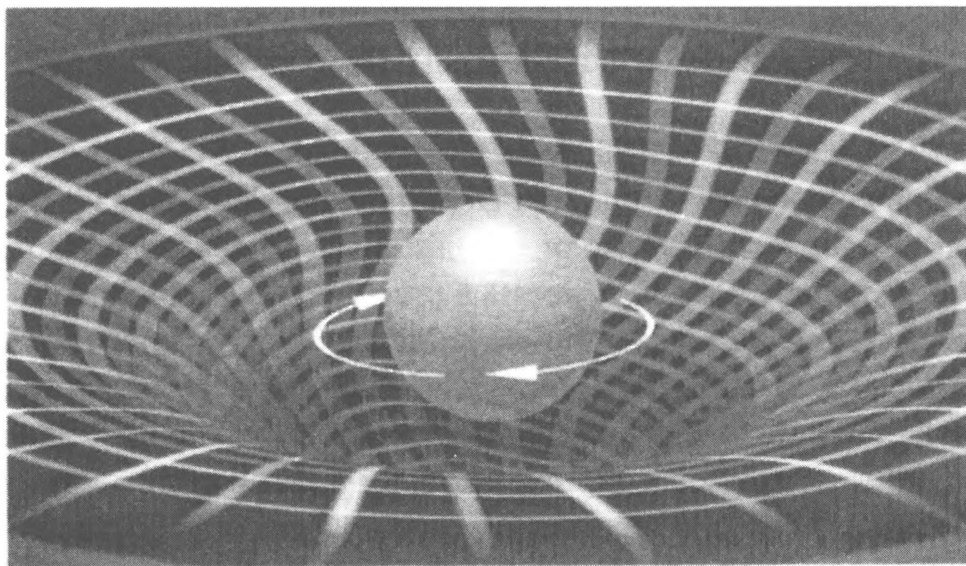


FIGURA 14.1. Un objeto masivo en rotación arrastra el espacio —los sistemas en caída libre— a su alrededor.

so lleno de agua —en reposo visto desde un punto de vista lejano— los cálculos muestran que el espacio en rotación ejercería una fuerza sobre el agua en reposo, haciéndola subir por las paredes del cubo y tomar una forma cóncava.

Este resultado le hubiera gustado mucho a Mach. Aunque quizá no le hubiera gustado la descripción en términos de «espacio en rotación» —puesto que esta expresión retrata al espaciotiempo como un algo— habría encontrado extraordinariamente gratificante que el movimiento de rotación *relativo* entre la esfera y el cubo haga que la forma del agua cambie. De hecho, para una corteza que contenga suficiente masa, una cantidad comparable a la contenida en el universo entero, los cálculos muestran que apenas importa si usted piensa que la esfera está girando alrededor del cubo o es el cubo el que está girando dentro de la esfera hueca. Como defendía Mach, lo único que importa es el

movimiento de rotación relativo entre los dos. Y puesto que los cálculos que he mencionado sólo hacen uso de la relatividad general, éste es un ejemplo explícito de una característica claramente machiana de la teoría de Einstein. (No obstante, mientras que el razonamiento machiano estándar afirmaría que el agua permanecería plana si el cubo girara en un universo infinito y vacío, la relatividad general discrepa. Lo que muestran los resultados de Pfister y Braun es que una esfera en rotación suficientemente masiva es capaz de bloquear completamente la influencia usual del espacio que yace más allá de la propia esfera.)

En 1960, Leonard Schiff, de la Universidad de Stanford e, independientemente, George Pugh, del Departamento de Defensa de Estados Unidos, sugirieron que la predicción de arrastre de sistema de la relatividad general podría ser puesta a prueba experimentalmente utilizando el movimiento rotacional de la Tierra. Schiff y Pugh se dieron cuenta de que según la física newtoniana, un giróscopo en rotación —un volante giratorio que está unido a un eje— flotando en órbita por encima de la superficie de la Tierra apuntaría en una dirección fija e invariable. Pero según la relatividad general su eje rotaría ligeramente debido al efecto de arrastre de espacio de la Tierra. Puesto que la masa de la Tierra es despreciable comparada con la hipotética esfera hueca utilizada en el cálculo de Pfister y Braun, el grado de arrastre de sistema causado por la rotación de la Tierra es minúsculo. Los cálculos detallados mostraban que si el eje de rotación del giróscopo estuviera inicialmente dirigido hacia una estrella de referencia escogida, al cabo de un año el espacio lentamente arremolinado habría desplazado la dirección de su eje en aproximadamente una cienmilésima de grado. Éste es el ángulo que barre el segundero de un reloj en aproximadamente dos millonésimas de segundo, de modo

que su detección presenta un importante desafío científico, tecnológico y de ingeniería.

Cuatro décadas de desarrollo y casi un centenar de tesis doctorales más tarde, un equipo de Stanford dirigido por Francis Everitt y financiado por la NASA está listo para hacer el experimento. Durante los próximos años su satélite Gravity Probe B, flotando a más de 600 kilómetros en el espacio y provisto de cuatro de los giróscopos más estables nunca construidos, intentará medir el arrastre de sistema provocado por la rotación de la Tierra. Si el experimento tiene éxito, será una de las confirmaciones más precisas de la relatividad general nunca conseguida, y proporcionará la primera evidencia directa de un efecto ma- chiano.[14.2] Igualmente excitante es la posibilidad de que los experimentos detecten una desviación de lo que predice la relatividad general. Una grieta minúscula de este tipo en los fundamentos de la relatividad general podría ser precisamente lo que necesitamos para echar una ojeada a las hasta ahora propiedades ocultas del espaciotiempo.

Pillando la onda

Una lección esencial de la relatividad general es que masa y energía hacen que el tejido del espaciotiempo se deforme; ilustramos esto en la figura 3.10 mostrando el entorno curvado que rodea al Sol. Sin embargo, una limitación de una figura estática es que no puede mostrar cómo evolucionan las deformaciones y curvas del espaciotiempo cuando la masa y la energía se mueven o cambian de alguna manera su configuración.[14.3] La relatividad general predice que de la misma forma que una cama elástica adopta una forma fija y deformada cuando usted está encima perfectamente quieto, pero sube y baja cuando

usted salta, el espacio puede adoptar una forma fija y curvada si la materia está perfectamente inmóvil, como se supone en la figura 3.10, pero aparecen rizos ondulantes a través de su tejido cuando la materia se mueve de un lado a otro. Einstein llegó a darse cuenta de esto entre 1916 y 1918, cuando utilizó las recientemente formuladas ecuaciones de la relatividad general para demostrar que —igual que las cargas eléctricas que se mueven arriba y abajo en una antena emisora producen ondas electromagnéticas (así es como se producen las ondas de radio y televisión)— la materia que se mueve a gran velocidad (como en una explosión de supernova) produce ondas gravitatorias. Y puesto que la gravedad es curvatura, una onda gravitatoria es una onda de curvatura. De la misma manera que arrojar una piedra en un estanque produce rizos en el agua que se extienden hacia afuera, la materia que gira genera rizos espaciales que se extienden hacia afuera; según la relatividad general, una explosión de supernova lejana es como una piedra cósmica que ha sido arrojada a un estanque espaciotemporal, como se ilustra en la figura 14.2. La figura resalta una importante característica distintiva de las ondas gravitatorias: a diferencia de las ondas electromagnéticas, las ondas sonoras y las ondas de agua —ondas que viajan a través del espacio— las ondas gravitatorias viajan *dentro* del espacio. Son distorsiones viajeras en la geometría del propio espacio.

Aunque las ondas gravitatorias son ahora una predicción aceptada de la relatividad general, durante muchos años el fenómeno estuvo envuelto en confusión y controversia, debido al menos en parte a una ad-

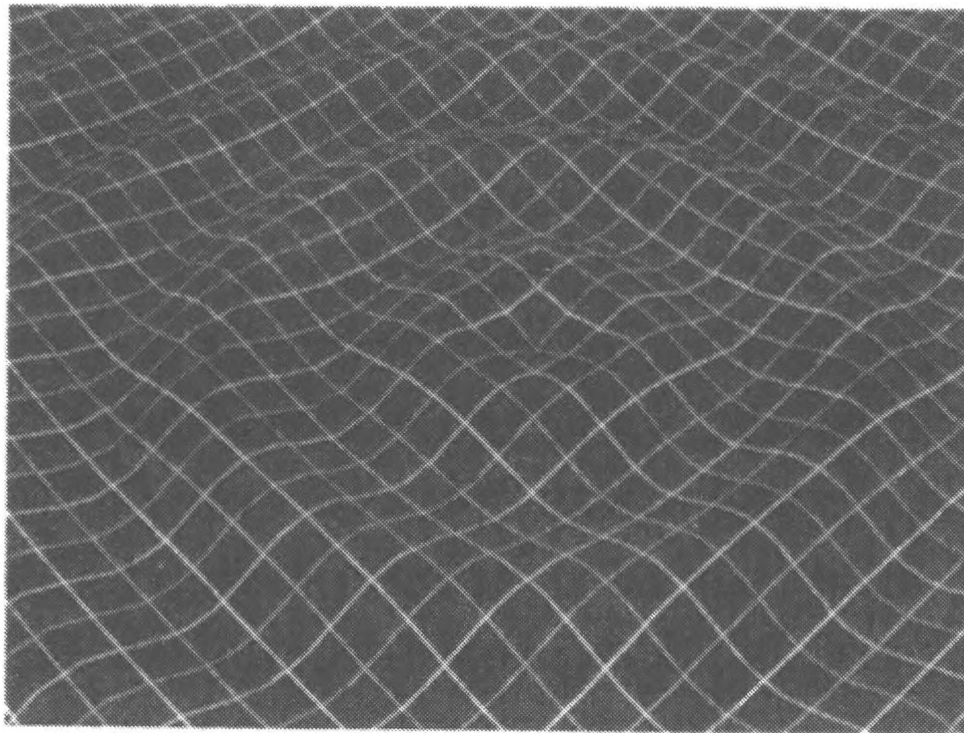


FIGURA 14.2. Las ondas gravitatorias son rizos en el tejido del espaciotiempo. hesión excesiva a la filosofía machiana. Si la relatividad general incorporase plenamente las ideas de Mach, entonces la «geometría del espacio» sería meramente un lenguaje conveniente para expresar la localización y movimiento de un objeto masivo con respecto a otro. El espacio vacío sería, en esta forma de pensar, un concepto vacío, de modo que ¿cómo podría ser razonable hablar de un espacio vacío ondulante? Muchos físicos trataron de demostrar que las supuestas ondas en el espacio equivalían a una interpretación errónea de las matemáticas de la relatividad general. Pero con el tiempo los análisis teóricos convergieron en la conclusión correcta: las ondas gravitato- rias son reales, y el .espacio *puede* rizarse.

Con cada cresta y vientre que pasa, la geometría distorsionada de una onda gravitatoria estira el espacio —y todo lo que hay en él— en una dirección y luego comprime el espacio —y todo lo que hay en él— en una dirección perpendicular, como en la representación muy exagerada de la figura 14.3. En principio, usted podría detectar el paso

de una onda gravitatoria midiendo repetidamente las distancias entre una variedad de localizaciones y encontrar que las razones entre dichas distancias habían cambiado momentáneamente.

En la práctica, nadie ha sido capaz de hacer esto, de modo que nadie ha detectado directamente una onda gravitatoria. (Sin embargo, hay alguna prueba indirecta convincente a favor de las ondas gravita- tonas.)[14.4] La dificultad está en que la influencia distorsionante del paso

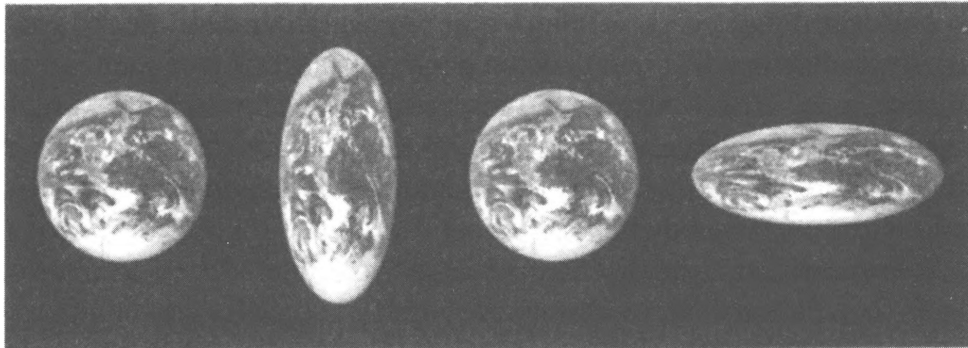


FIGURA 14.3. El paso de una onda gravitatoria estira un objeto en una dirección y luego en la otra. (En esta imagen, la escala de distorsión para una onda gravitatoria típica está enormemente exagerada.)

de una onda gravitatoria es normalmente minúscula. La bomba atómica probada en Trinidad el 16 de julio de 1945 tenía un poder explosivo equivalente a 20.000 toneladas de TNT y era tan brillante que testigos a kilómetros de distancia tenían que llevar gafas de protección para evitar graves daños debidos a las ondas electromagnéticas que generó. Pese a todo, incluso si usted hubiera estado situado al pie de la torre de acero de 30 metros de altura sobre la que estaba la bomba, las ondas gravitatorias que produjo su explosión habrían estirado su cuerpo en una dirección u otra tan sólo en una minúscula fracción de un diámetro atómico.

Así son de relativamente débiles las perturbaciones gravitatorias, lo que da una idea de los retos tecnológicos que implica el detectarlas. (Puesto que una onda gravitatoria también puede considerarse como un enorme número de gravitones que viajan de una forma coordinada —igual que una onda electromagnética está compuesta de un enorme número de fotones coordinados— esto también da una idea de lo difícil que es detectar un *único* gravitón.)

Por supuesto, no estamos particularmente interesados en detectar las ondas gravitatorias producidas por armas nucleares, pero la situación con las fuentes astrofísicas no es mucho más fácil. Cuanto más próxima esté y más masiva sea la fuente astrofísica, y más enérgico y violento sea el movimiento implicado, más intensas serían las ondas gravitatorias que recibiríamos. Pero incluso si una estrella a una distancia de 10.000 años luz se transformara en supernova, cuando la onda gravitatoria resultante pasara por la Tierra estiraría una vara de un metro de longitud en sólo una milbillonésima de centímetro, apenas una centésima del tamaño de un núcleo atómico. Así, a menos que un suceso astrofísico altamente inesperado y de proporciones verdaderamente cataclísmicas suceda relativamente cerca, detectar una onda gravitatoria requerirá un aparato capaz de responder a cambios de longitud fantásticamente pequeños.

Los científicos que diseñaron y construyeron el Láser Interfero- meter Gravitational Wave Observatory (LIGO) (gestionado conjuntamente por el Instituto de Tecnología de California y el Instituto de Tecnología de Massachusetts y financiado por la Fundación Nacional de la Ciencia) han aceptado el desafío. LIGO es impresionante y la sensibilidad esperada es asombrosa. Consiste en dos tubos huecos, cada uno de *cuatro kilómetros* de longitud y un poco más de un metro de diámetro, que están dispuestos formando una L

gigante. Haces de luz láser enviados simultáneamente a lo largo de túneles de vacío dentro de cada tubo, y reflejados por espejos altamente pulidos, se utilizan para medir la longitud relativa de cada uno con fantástica precisión. La idea es que si pasara una onda gravitatoria, estiraría un tubo con respecto al otro, y si el estiramiento es suficientemente grande, los científicos serían capaces de detectarlo.

Los tubos son largos porque el estiramiento y la compresión que produce la onda gravitatoria son acumulativos. Si una onda gravitatoria estirara algo de cuatro metros de longitud en, digamos, 1O”^{20} metros, estiraría algo de cuatro kilómetros de longitud mil veces más, 10^{-17} metros. Así, cuanto más larga es la extensión monitorizada, más fácil es detectar un cambio en su longitud. Para sacar el mejor partido de esto, los experimentadores de LIGO dirigen en realidad los láseres para que reboten más de cien veces entre espejos colocados en los extremos de cada tubo, aumentando la distancia monitorizada hasta unos 800 kilómetros por haz. Con estos trucos inteligentes y estas hazañas de ingeniería LIGO debería ser capaz de detectar cualquier cambio en las longitudes de los tubos que supere una billonésima del grosor de un cabello humano —una cienmillonésima del tamaño de un átomo.

¡Ah!, y hay en realidad dos de estos aparatos con forma de L. Uno está en Livingstone, Luisiana, y el otro a unos 3.200 kilómetros en Hanford, Washington. Si una onda de gravedad procedente de alguna catástrofe astrofísica lejana pasara por la Tierra, debería afectar de forma idéntica a cada detector, de modo que cualquier onda captada por un experimento tendría que manifestarse también en el otro. Éste es un test de consistencia importante, puesto que pese a todas las precauciones que se han tomado para apantallar

los detectores, las perturbaciones de la vida cotidiana (el temblor de un camión que pasa, el impacto de un árbol que cae, y todo lo demás) podrían pasar como ondas gravitatorias. Requerir coincidencia entre detectores distantes sirve para descartar estos falsos positivos.

Los investigadores también han calculado cuidadosamente las frecuencias de las ondas gravitatorias —el número de crestas y vientres que debería atravesar su detector cada segundo— que esperan que sean producidas por un abanico de fenómenos astrofísicos incluyendo explosiones de supernova, el movimiento rotatorio de estrellas de neutrones no esféricas y las colisiones entre agujeros negros. Sin esta información, los experimentadores estarían buscando una aguja en un pajar; con ellas pueden concentrar los detectores en una estrecha banda de frecuencias de interés físico. Curiosamente, los cálculos revelan que algunas frecuencias de las ondas gravitatorias deberían estar en el rango de unos miles de ciclos por segundo; si fueran ondas sonoras, estarían precisamente en el intervalo de audibilidad humana. Las estrellas de neutrones coalescentes sonarían como un chirrido con un tono rápidamente creciente, mientras que un par de agujeros negros en colisión imitarían el gorjeo de un gorrión que haya recibido un golpe. Hay una enorme cacofonía de ondas gravitatorias que oscilan a través del tejido del espaciotiempo, y si todo va según los planes, LIGO será el primer instrumento en sintonizarla.[14.5]

Lo que hace todo esto tan excitante es que las ondas gravitatorias maximizan la utilidad de dos características principales de la gravedad: su debilidad y su ubicuidad. Esto implica que las ondas gravitatorias pueden atravesar materiales que son opacos a la luz, dando acceso a dominios astrofísicos previamente ocultos. Y lo que es más, puesto que todo está sometido a la gravedad (mientras que

la fuerza electromagnética, por ejemplo, sólo afecta a objetos que tienen una carga eléctrica), todo tiene la capacidad de generar ondas gravitatorias y producir con ello una firma observable. LIGO marca así un punto de retomo importante en la forma en que examinamos el cosmos.

Hubo un tiempo en el que todo lo que podíamos hacer era levantar los ojos y mirar al cielo. En el siglo xvn Hans Lippershey y Galileo Galilei cambiaron eso. Con la ayuda del telescopio, la gran vista del cosmos estuvo al alcance de la Humanidad. Pero con el tiempo comprendimos que la luz visible representaba una banda estrecha de ondas electromagnéticas. En el siglo xx, con la ayuda de telescopios de infrarrojos, ondas de radio, rayos X y rayos gamma el cosmos se abrió de nuevo a nosotros, revelando maravillas invisibles en las longitudes de onda de la luz a las que nuestros ojos se habían acostumbrado por la evolución. Ahora, en el siglo xxi, estamos abriendo los cielos una vez más. Con LIGO y sus mejoras posteriores[*42] veremos el cosmos de una forma completamente nueva. Más que utilizar ondas electromagnéticas utilizaremos ondas gravitatorias; más que utilizar la fuerza electromagnética, utilizaremos la fuerza gravitatoria.

Para apreciar lo revolucionaria que puede ser esta nueva tecnología imagine un mundo en el que científicos alienígenas estuvieran a punto de descubrir la forma de detectar ondas electromagnéticas —luz— y piense en el profundo cambio que sufriría su visión del universo. Estamos en la víspera de nuestra primera detección de ondas gravitatorias y por ello quizá en una posición similar. Durante milenios hemos mirado al cosmos; ahora es como si, por primera vez en la historia humana, lo fuéramos a oír.

La caza de las dimensiones extras

Antes de 1996 la mayoría de los modelos teóricos que incorporaban dimensiones extras imaginaban que su extensión espacial era aproximadamente planckiana (10^{-33} centímetros). Puesto que esto es diecisiete órdenes de magnitud más pequeño que algo resoluble utilizando los equipos actualmente disponibles, sin el descubrimiento de una nueva tecnología milagrosa la física planckiana permanecerá fuera de alcance. Pero si las dimensiones extras son «grandes», lo que significa mayores que una centésima de trillonésima (1O“^{20}) de metro, aproximadamente una millonésima del tamaño de un núcleo atómico, hay esperanzas.

Como discutimos en el capítulo 13, si cualquiera de las dimensiones extras es «muy grande» —a pocos órdenes de magnitud de un milímetro— medidas de precisión de la intensidad de la gravedad deberían revelar su existencia. Tales experimentos han estado en curso durante algunos años y las técnicas se han refinado rápidamente. Hasta ahora no se ha encontrado ninguna desviación de la ley de la inversa del cuadrado característica de tres dimensiones espaciales, de modo que los investigadores están acudiendo a distancias más pequeñas. Una señal positiva sacudiría, cuando menos, las bases de la física. Proporcionaría evidencia de dimensiones extras accesibles sólo a la gravedad, y eso daría fuerte apoyo circunstancial al escenario mundobra- na de la teoría M/de cuerdas.

Si las dimensiones extras son grandes pero no muy grandes, es poco probable que sean detectadas en experimentos de precisión con la gravedad, pero siguen estando disponibles otras aproximaciones indirectas. Por ejemplo, mencionamos antes que las dimensiones extras grandes implicarían que la intensidad intrínseca de la gravedad es mayor que lo que se pensaba previamente. La debilidad observada de la gravedad sería atribuida a su fuga

en las dimensiones extras, no a que sean fundamentalmente débiles; a escalas de distancia cortas, antes de que ocurra dicha fuga, la gravedad sería fuerte. Entre otras implicaciones, esto significa que la creación de agujeros negros minúsculos requeriría una masa y una energía mucho menores que en un universo en el que la gravedad es intrínsecamente mucho más débil. En el capítulo 13 discutimos la posibilidad de que tales agujeros negros microscópicos pudieran ser generados por colisiones protón-protón de alta energía en el Gran Colisionador de Hadrones, el acelerador de partículas ahora en construcción en Ginebra, Suiza, y cuya terminación está prevista en 2007. Ésta es una perspectiva excitante. Pero hay otra posibilidad tentadora que fue planteada por Alfred Shapere, de la Universidad de Kentucky, y Jonathan Feng, de la Universidad de California en Irving. Estos investigadores señalaron que los rayos cósmicos —partículas elementales que fluyen a través del espacio y bombardean continuamente nuestra atmósfera— también podrían desencadenar la producción de agujeros negros microscópicos.

Las partículas de los rayos cósmicos fueron descubiertas en 1912 por el científico austríaco Victor Hess; más de nueve décadas después siguen presentando muchos misterios. Cada segundo, rayos cósmicos penetran en la atmósfera e inician una cascada de miles de millones de partículas que llueven hacia la superficie de la Tierra y atraviesan su cuerpo y el mío. Algunas de ellas son detectadas por una variedad de instrumentos destinados a ello en todo el mundo. Pero nadie está completamente seguro de qué tipo de partículas constituyen los rayos cósmicos incidentes (aunque hay un consenso creciente en que son protones), y pese a que se cree que algunas de estas partículas de alta energía proceden de explosiones de

supernova, nadie tiene ninguna idea de dónde se originan los rayos cósmicos de energía más alta. Por ejemplo, el 15 de octubre de 1991, el detector de rayos cósmicos Ojo de Mosca, en el desierto de Utah, midió una partícula que cruzó el cielo con una energía equivalente a 30.000 millones de veces la masa de un protón. Ésta es una energía casi tan alta como la de una bola rápida lanzada por Mariano Rivera pero contenida en una única partícula subatómica, y es unos 100 millones de veces mayor que las energías de las partículas que serán producidas por el Gran Colisionador de Hadrones.[14.6] Lo enigmático es que ningún proceso astrofísico conocido podría producir partículas con una energía tan alta; los experimentadores están recogiendo más datos con detectores más sensibles con la esperanza de resolver el misterio.

Para Shapere y Feng, el origen de las partículas de rayos cósmicos superenergéticas era de importancia secundaria. Ellos comprendieron que independientemente de cuál sea el origen de tales partículas, si la gravedad a escalas microscópicas es mucho más intensa de lo que antes se pensaba, las partículas de rayos cósmicos de la máxima energía podrían tener la fuerza suficiente para crear minúsculos agujeros negros cuando chocan violentamente con las capas altas de la atmósfera.

Como sucede con su producción en los colisionadores de átomos, tales agujeros negros minúsculos no supondrían el más mínimo peligro para los experimentadores o el mundo en general. Tras su creación, se desintegrarían rápidamente, emitiendo una cascada característica de otras partículas más normales. De hecho, los agujeros negros microscópicos tendrían una vida tan corta que los experimentadores no los buscarían directamente; en su lugar, buscarían evidencia de agujeros negros a través de estudios detallados de los chaparrones de partículas resultantes que caerían en sus

detectores. Actualmente se está construyendo en una vasta extensión de tierra en el oeste de Argentina el más sensible de los detectores de rayos cósmicos en todo el mundo, el Observatorio Pierre Auger —con un área de observación del tamaño de Road Island—. Shapere y Feng estiman que si todas las dimensiones extras son tan grandes como 10^{-14} metros, entonces al cabo del equivalente a un año de recogida de datos, el detector Auger verá los residuos de partículas característicos de aproximadamente una docena de agujeros negros minúsculos producidos en la parte superior de la atmósfera. Si no se encuentran estas firmas de agujeros negros, el experimento concluirá que las dimensiones extras son más pequeñas. Encontrar los restos de agujeros negros producidos en colisiones de rayos cósmicos es ciertamente difícil, pero el éxito abriría la primera ventana experimental a las dimensiones extras, agujeros negros, teoría de cuerdas y gravedad cuántica.

Además de la producción de agujeros negros, hay otra manera en la que los investigadores buscarán dimensiones extras durante la próxima década con la ayuda de los aceleradores. Esta idea es una variante sofisticada de la explicación «espacio-entre-los-cojines» para las monedas perdidas que le faltan en su bolsillo.

Un principio central de la física es el principio de conservación de la energía. La energía puede manifestarse de muchas formas —la energía cinética del movimiento de una bola cuando sale disparada de un bate de béisbol, energía potencial cuando la bola vuela hacia arriba, energía sonora y calorífica cuando la bola golpea en el suelo y excita todo tipo de movimientos vibratorios, la energía de la masa que está encerrada en la propia bola, y demás— pero cuando se han tenido en cuenta todos los portadores de energía, la cantidad con la que usted termina es siempre igual a la cantidad con la que empezó.[14.7] Hasta la fecha,

ningún experimento contradice esta ley de balance energético perfecto.

Pero dependiendo del tamaño preciso de las dimensiones extras supuestas, experimentos de alta energía que van a realizarse en la instalación recién actualizada en Fermilab y en el Gran Colisionador de Hadrones pueden revelar procesos que parecen violar la conservación de la energía: la energía al final de una colisión puede ser menor que la energía al principio. La razón es que, de forma muy parecida a sus monedas desaparecidas, la energía (transportada por los gravitones) puede esconderse en las grietas —el minúsculo espacio adicional— que proporcionan las dimensiones extras y ser así pasada por alto en los cálculos del balance energético. La posibilidad de una «señal de energía faltante» semejante proporciona aún otro medio para establecer que el tejido del cosmos tiene una complejidad mucho más allá de la que podemos ver directamente.

Sin duda, cuando se trata de dimensiones extras, yo no soy imparcial. He trabajado en aspectos de las dimensiones extras durante más de quince años, de modo que ellas tienen un lugar especial en mi corazón. Pero, hecha esta confesión, me resulta difícil imaginar un descubrimiento que fuera más excitante que encontrar evidencia a favor de dimensiones además de las tres que a todos nos son familiares. En mi opinión, no hay actualmente ninguna otra propuesta seria cuya confirmación sacudiera tanto la base de la física y, con ello, estableciera que debemos estar dispuestos a cuestionar los elementos básicos, aparentemente evidentes, de la realidad.

La Higgs, la supersimetría y la teoría de cuerdas

Además de los desafíos científicos de buscar en lo desconocido, y la posibilidad de encontrar evidencia de dimensiones extras, hay un par de motivaciones especiales para las mejoras recientes del acelerador Fermilab y la construcción del gigantesco Gran Colisionador de Hadrones. Una es encontrar partículas de Higgs. Como discutimos en el capítulo 9, las escurridizas partículas de Higgs serían los constituyentes más pequeños de un campo de Higgs —un campo, suponen los físicos, que forma el océano de Higgs y con ello da masa a los otros tipos de partículas fundamentales—. Estudios teóricos y experimentales actuales sugieren que la Higgs debería tener una masa comprendida entre un centenar y un millar de veces la masa del protón, Si el extremo más bajo de este intervalo resulta ser correcto, Fermilab tiene una oportunidad razonable de descubrir una partícula de Higgs en el futuro próximo. Y ciertamente, si Fermilab no lo descubre y el intervalo de masa estimado es en cualquier caso correcto, el Gran Colisionador de Hadrones debería producir partículas de Higgs en cantidad para finales de la década. La detección de partículas de Higgs sería un jalón fundamental, pues confirmaría la existencia de campos que los físicos teóricos de partículas y los cosmólogos han invocado durante décadas, sin ninguna evidencia experimental que lo apoye.

Otro objetivo importante de Fermilab y del Gran Colisionador de Hadrones es detectar evidencia de supersimetría. Recordemos del capítulo 12 que pares de partículas supersimétricas cuyos espines difieren en media unidad es una idea que surgió originalmente de estudios de la teoría de cuerdas a principios de la década de 1970. Si la supersimetría es relevante para el mundo real, entonces por cada tipo de partícula conocido con espín ‘/$_2$ debería haber una partícula asociada con espín 0; por cada tipo de

partícula conocida de espín 1, debería haber una partícula asociada de espín '/$_2$. Por ejemplo, para el electrón de espín ‘/$_2$ debería haber una partícula supersimétrica de espín 0 llamada *electrón supersimétrico,* o *selectrón,* para abreviar; para los quarks de espín ’/$_2$ debería haber *quarks supersimétricas,* o *squarks*', para neutrinos de espín '/$_2$ debería haber *neutrinos* de espín 0; para gluones, fotones y partículas W y Z de espín 1 debería haber *gluinos, fotinos y winos y zinos* de espín 0. (Sí, los físicos no pueden evitarlo.)

Nadie ha detectado todavía ninguna de estas pretendidas contrafiguras. Los físicos cruzan los dedos confiando en que eso se explica porque las partículas supersimétricas son sustancialmente más pesadas que sus contrapartidas conocidas. Consideraciones teóricas sugieren que las partículas supersimétricas podrían ser mil veces más masivas que un protón, y en ese caso no tendría ningún misterio que no aparezcan en los datos experimentales: los colisionadores de átomos no tienen la energía adecuada para producirlos. En la próxima década todo esto cambiará. Ya, el recién mejorado acelerador en Fermilab intenta descubrir partículas supersimétricas. Y, como sucede con la Higgs, si el Fermilab no llegara a encontrar evidencia de supersimetría, y si el rango de masas esperado para las partículas supersimétricas es aproximado, el Gran Colisionador de Hadrones podría producirlas con facilidad.

La confirmación de la supersimetría sería el desarrollo más importante en la física de partículas elementales en más de dos décadas. Establecería el próximo paso en nuestra comprensión más allá del exitoso modelo estándar de la física de partículas y proporcionaría evidencia circunstancial de que la teoría de cuerdas está en el camino correcto. Pero note que eso no demostraría la teoría de cuerdas propiamente dicha. Incluso si la supersimetría se

descubrió mientras se desarrolla la teoría de cuerdas, los físicos han sabido desde hace tiempo que la supersimetría es un principio más general que puede incorporarse con facilidad en la aproximación tradicional de partículas puntuales. La confirmación de la supersimetría establecería un elemento vital del marco de las cuerdas y guiaría mucha investigación posterior, pero no sería una prueba definitiva de la verdad de la teoría de cuerdas.

Por el contrario, si el escenario mundobrana es correcto, los próximos experimentos en los aceleradores tienen la capacidad para confirmar la teoría de cuerdas. Como se mencionó brevemente en el capítulo 13, si las dimensiones extras en el escenario mundobrana fueran tan grandes como 10“^{16} centímetros, no sólo la gravedad sería intrínsecamente más intensa de lo que antes se pensaba sino que las cuerdas serían también significativamente más largas. Puesto que las cuerdas más largas son menos rígidas, necesitarían menos energía para vibrar. Mientras que en el marco de cuerdas convencional las pautas vibracionales de las cuerdas tenían energías que están mil billones de veces más allá de nuestro alcance experimental, en el escenario mundobrana las energías de las pautas vibracionales de cuerdas podrían reducirse hasta *mil* veces la masa del protón. Si así fuera, las colisiones de alta energía en el Gran Colisionador de Hadrones serían similares a una pelota de golf bien golpeada rebotando en el interior de un piano; la colisión tendría energía suficiente para excitar muchas «octavas» de pautas vibracionales de cuerdas. Los experimentos detectarían una panoplia de nuevas partículas nunca vistas —es decir, nuevas pautas vibracionales de cuerdas nunca vistas— cuyas energías corresponderían a las resonancias armónicas de la teoría de cuerdas.

Las propiedades de estas partículas y las relaciones entre ellas mostrarían inequívocamente que todas forman parte de la misma partitura cósmica, que todas son diferentes pero están relacionadas, que todas son pautas vibracionales diferentes de un mismo tipo de objeto: una cuerda. En un futuro previsible, éste es el escenario más probable para una confirmación directa de la teoría de cuerdas.

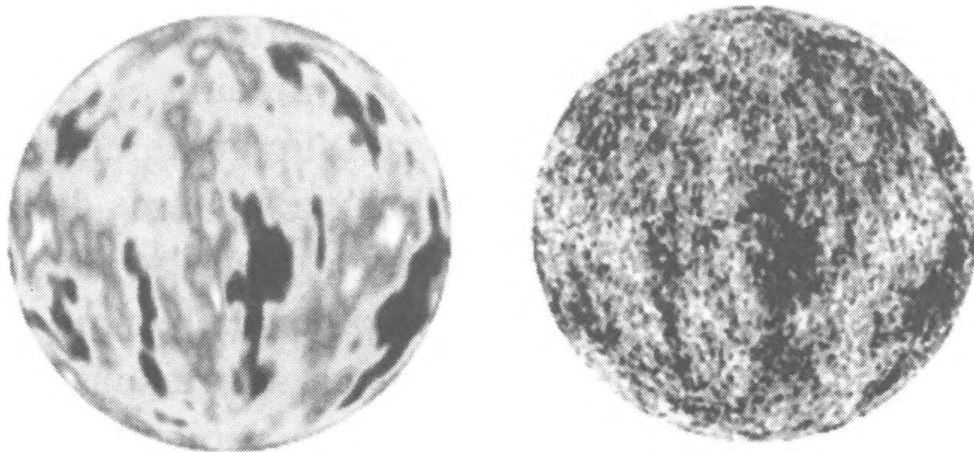
Orígenes cósmicos

Como vimos en capítulos anteriores, la radiación de fondo cósmico de microondas ha desempeñado un papel dominante en la investigación cosmológica desde su descubrimiento a mediados de la década de 1960. La razón es clara: en las etapas tempranas del universo, el espacio estaba lleno de un baño de partículas cargadas eléctricamente —electrones y protones— que, a través de la fuerza electromagnética, azotaban incesantemente a los fotones en una dirección u otra. Pero apenas 300.000 años después del *bang,* el universo se enfrió lo suficiente como para que electrones y protones se combinaran en átomos eléctricamente neutros —y desde ese instante en adelante, la radiación ha viajado por el espacio, básicamente inalterada, ofreciendo una instantánea del universo primitivo—. Hay aproximadamente 400 millones de estos fotones de microondas cósmicas primordiales fluyendo por cada metro cúbico de espacio, como reliquias prístinas del universo primitivo.

Las medidas iniciales de la radiación de fondo de microondas revelaron que su temperatura es extraordinariamente uniforme, pero como discutimos en el capítulo 11, un examen más detallado, realizado por primera vez en 1992 por el Cosmic Background Explorer

(COBE) y mejorado desde entonces por varios proyectos observacio- nales, encontró evidencia de pequeñas variaciones de temperatura, como se ilustra en la figura 14.4a. Los datos están codificados en una escala de grises, con regiones claras y oscuras que indican variaciones de temperatura de unas pocas diezmilésimas de grado. Las manchas de la figura muestran las no uniformidades minúsculas pero innegablemente reales de la temperatura de la radiación en el cielo.

Aunque era un descubrimiento impresionante por sí mismo, el experimento de COBE también marcó un cambio fundamental en la naturaleza de la investigación cosmológica. Antes de COBE, los datos cosmológicos eran toscos. A su vez, una teoría cosmológica se consideraba viable si podía ajustar las características a grandes rasgos de las observaciones astronómicas. Los teóricos podían proponer un esquema tras otro con sólo una mínima consideración para satisfacer las



(a)(b)

FIGURA 14.4. (a) Datos de la radiación de fondo cósmico de microondas recogida por el satélite COBE. La radiación ha estado viajando sin obstáculos a través del espacio desde hace unos 300.000 años después del *big bang,* de modo que esta imagen muestra las minúsculas

variaciones de temperatura presentes en el universo hace casi 14.000 millones de años, (b) Datos mejorados recogidos por el satélite WMAP.

ligaduras observacionales. Sencillamente no había muchas ligaduras observacionales, y las que existían no eran particularmente precisas. Pero COBE inició una nueva era en la que los estándares se habían hecho mucho más exigentes. Hay ahora un cuerpo creciente de datos precisos con los que cualquier teoría debe estar en buen acuerdo para ser siquiera considerada. En 2001, el satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), una empresa conjunta de la NASA y la Universidad de Princeton, fue lanzado para medir la radiación de fondo de microondas con una resolución y sensibilidad aproximadamente 40 veces mayor que la de COBE. Comparando los resultados iniciales, figura 14.4b, con los de COBE, figura 14.4a, usted puede ver inmediatamente el detalle mucho más fino que la imagen puede proporcionar. Otro satélite, Planck, que se está desarrollando en la Agencia Espacial Europea, está programado para su lanzamiento en 2007 y, si todo va según los planes, mejorará la resolución en un factor de 10.

La llegada de datos precisos ha aventado el campo de las propuestas cosmológicas, siendo el modelo inflacionario, con mucho, el candidato destacado. Pero como se mencionó en el capítulo 10, la cosmología inflacionaria no es una teoría única. Los teóricos han propuesto muchas versiones diferentes (inflación nueva, inflación vieja, inflación caliente, inflación híbrida, hiperinflación, inflación asistida, inflación eterna, inflación extendida, inflación caótica, inflación doble, inflación de escala débil, inflación hipematural, por nombrar sólo algunas), cada una de las cuales incluye la marca de la breve ráfaga de expansión rápida, pero todas difieren en los detalles del número de campos y sus formas de energía potencial, en qué campos están asentados en mesetas, y demás. Estas diferencias dan lugar a predicciones

ligeramente diferentes para las propiedades de la radiación de fondo de microondas (campos diferentes con energías diferentes tienen fluctuaciones cuánticas ligeramente diferentes). La comparación con los datos de WMAP y Planck sería capaz de descartar muchas propuestas y refinar sustancialmente nuestra comprensión.

De hecho, los datos pueden estrechar el campo todavía más. Aunque las fluctuaciones cuánticas estiradas por la expansión inflacionaria ofrecen una explicación convincente para las variaciones de temperatura observadas, este modelo tiene un competidor. El modelo cosmológico cíclico de Steinhardt y Turok, descrito en el capítulo 12, ofrece una propuesta alternativa. Cuando las dos tres-branas del modelo cíclico se dirigen lentamente una hacia otra, las fluctuaciones cuánticas hacen que partes diferentes se acerquen a velocidades ligeramente diferentes. Cuando finalmente se juntan, aproximadamente un billón de años más tarde, localizaciones diferentes en las branas tomarán contacto en instantes ligeramente diferentes, como si se juntaran dos hojas de papel de lija grueso. Las minúsculas desviaciones respecto a un impacto perfectamente uniforme dan minúsculas desviaciones respecto a una evolución perfectamente uniforme en cada brana. Puesto que se supone que una de las branas es nuestro espacio tridimensional, las desviaciones de la uniformidad son desviaciones que deberíamos poder detectar. Steinhardt, Turok y sus colaboradores han argumentado que las inhomogeneidades generan desviaciones de temperatura similares a las que salen del marco inflacionario, y así, con los datos de hoy, el modelo cíclico ofrece una explicación igualmente viable para las observaciones.

Sin embargo, los datos más refinados que se recojan durante la próxima década pueden ser capaces de distinguir entre las dos aproximaciones. En el marco inflacionario, no

sólo las fluctuaciones cuánticas del campo inflatón son estiradas por la ráfaga de expansión exponencial, sino que el intenso estiramiento genera minúsculos rizos cuánticos en el tejido del espacio. Puesto que los rizos en el espacio no son otra cosa que ondas gravitatorias (como vimos en nuestra discusión anterior de LIGO), el marco inflacionario predice que ondas gravitatorias fueron producidas en los primeros momentos del universo.[14.8] Se las suele llamar *ondas gravitatorias primordiales,* para distinguirlas de las generadas más recientemente por violentos sucesos astrofísicos. En el modelo cíclico, por el contrario, la desviación de la uniformidad perfecta se forma suavemente, durante el curso de una longitud de tiempo casi inimaginable, ya que las branas tardan un billón de años en acercarse lentamente hacia su próximo choque. La ausencia de un cambio enérgico en la geometría de las branas, y en la geometría del espacio, significa que no se generan rizos espaciales, de modo que el modelo cíclico predice una ausencia de ondas gravitatorias primordiales. Así pues, si se detectaran ondas gravitatorias cosmológicas primordiales, ello sería otro triunfo para el marco inflacionario y descartaría definitivamente la aproximación cíclica.

Es poco probable que LIGO tenga la suficiente sensibilidad para detectar las ondas gravitatorias predichas de la inflación, pero es posible que sean observadas indirectamente o bien por Planck o bien por otro experimento desde un satélite llamado experimento Cosmic Mi- crowave Background Polarization (CMBPol) que ahora está en fase de diseño. Planck, y CMBPol en particular, no se centrarán únicamente en las variaciones de temperatura de la radiación de fondo de microondas, sino que también medirán la *polarización,* las direcciones de espín promedio de los fotones de microondas detectados. Mediante una cadena de razonamientos demasiado complicada para

describir aquí, resulta que las ondas gravitatorias procedentes del *bang* dejarían una huella característica en la polarización de la radiación de fondo de microondas, una huella quizá suficientemente grande para ser medida.

Así, en menos de una década podemos tener una buena idea de si el bang fue realmente un colisión, y si el universo que conocemos es realmente una tres-brana. En la edad dorada de la cosmología, algunas de las ideas más fantásticas pueden ser realmente puestas a prueba.

Materia oscura, energía oscura y el futuro del universo

En el capítulo 10 expusimos la fuerte evidencia teórica y observacio- nal que indica que apenas un 5 por 100 del universo procede de constituyentes que se encuentran en la materia familiar —protones y neutrones (los electrones dan cuenta de menos del 0,05 por 100 de la masa de la materia ordinaria)— mientras que el 25 por 100 procede de la materia oscura y el 70 por 100 de la energía oscura. Pero sigue habiendo una incertidumbre importante con respecto a la identidad detallada de todo este material oscuro. Una conjetura natural es que la materia oscura esté también compuesta de protones y neutrones, que de algún modo evitaron agruparse para formar estrellas que emiten luz. Pero otras consideraciones teóricas hacen muy improbable esta posibilidad.

Mediante observaciones detalladas, los astrónomos tienen un conocimiento claro de las abundancias medias relativas de los elementos ligeros —hidrógeno, helio, deuterio y litio— que están dispersos por el cosmos. Hasta un alto grado de precisión, las abundancias están de acuerdo con los cálculos teóricos de los procesos que se

cree que han sintetizado estos núcleos durante los primeros minutos del universo. Este acuerdo es uno de los grandes éxitos de la teoría cosmológica moderna. Sin embargo, estos cálculos suponen que el grueso de la materia oscura no está compuesto de protones y neutrones; si, en escalas cosmológicas, los protones y los neutrones fueran un constituyente dominante, la receta cósmica no vale y los cálculos dan resultados que están descartados por las observaciones.

Entonces, si no son protones y neutrones, ¿qué constituye la materia oscura? Hoy por hoy, nadie lo sabe, pero no hay escasez de propuestas. Los nombres de los candidatos van desde axiones a zinos, y quienquiera que encuentre la respuesta tendrá asegurada una visita a Estocolmo. Que nadie haya detectado todavía una partícula de materia oscura impone ligaduras importantes a cualquier propuesta. La razón es que la materia oscura no sólo está situada en el espacio exterior; está distribuida a lo largo del universo y por eso también está cerca de nosotros aquí en la Tierra. Según muchas de las propuestas, precisamente ahora miles de millones de partículas de materia oscura están atravesando su cuerpo cada segundo, de modo que los candidatos viables son sólo aquellas partículas que pueden atravesar gran cantidad de materia sin dejar una huella importante.

Los neutrinos son una posibilidad. Los cálculos estiman que sus reliquias abundan desde que fueron producidos en el *big bang,* aproximadamente 55 millones por metro cúbico de espacio, de modo que si cualquiera de las tres especies de neutrinos pesara aproximadamente una cienmillonésima (10 ^{8}) parte de la masa de un protón, ellos suministrarían la materia oscura. Aunque experimentos recientes han proporcionado fuerte evidencia de que los neutrinos tienen masa, según los datos actuales son demasiado ligeros para

suministrar la materia oscura; se quedan cortos en un factor de más de 100.

Otra propuesta prometedora implica partículas supersimétricas, especialmente el *fotino,* el *zino* y el *higgino* (los socios del fotón, la Z y la Higgs). Estas son las más extrañas de las partículas supersimétricas —podrían atravesar sin problemas toda la Tierra sin el más mínimo efecto en su movimiento— y por eso podrían haber escapado fácilmente a la detección.**[14.9]** A partir de cálculos de cuántas de estas partículas habrían sido producidas en el *big bang* y sobrevivido hasta hoy, los físicos estiman que tendrían que tener una masa del orden de 100 a 1.000 veces la del protón para suministrar la materia oscura. Éste es un número intrigante, porque varios estudios de modelos de partículas supersimétricas así como de la teoría de supercuerdas han llegado al mismo rango de masas para estas partículas, sin ninguna preocupación por la materia oscura o la cosmología. Esto sería una confluencia enigmática y completamente inesperada, a menos, por supuesto, que la materia oscura esté compuesta de partículas supersimétricas. Así pues, la búsqueda de partículas supersimétricas en los acelerados actuales y futuros del mundo puede verse también como búsqueda de los candidatos favoritos a materia oscura.

También se están realizando investigaciones más directas de las partículas de materia oscura que atraviesan la Tierra, aunque son experimentos extraordinariamente difíciles. Del millón aproximadamente de partículas de materia oscura que estarían atravesando cada segundo un área del tamaño de un palmo, al menos una por día dejaría algún rastro en los aparatos que varios experimentadores han construido específicamente diseñados para detectarlos. Hasta la fecha no se ha conseguido ninguna detección confirmada de partículas de materia oscura.**[14.10]** Con el

premio aún en el aire, los investigadores están avanzando con mucha rapidez. Es muy posible que dentro de los próximos años quede establecida la identidad de la materia oscura.

La confirmación definitiva de que la materia oscura existe, y la determinación directa de su composición, sería un avance fundamental. Por primera vez en la historia aprenderíamos algo que es a la vez totalmente básico y sorprendentemente escurridizo: la constitución de la inmensa mayoría del contenido material del universo.

De todas formas, como vimos en el capítulo 10, datos recientes sugieren firmemente que incluso con la identificación de la materia oscura habría todavía un giro argumental importante cuyos orígenes necesitarían comprobación experimental: las observaciones de supernova que dan evidencia de una constante cosmológica que presiona hacia afuera y da cuenta del 70 por 100 de la energía total en el universo. Siendo el descubrimiento más excitante e inesperado de la última década, las pruebas a favor de una constante cosmológica —una energía que llena el espacio— necesitan una firme confirmación. Varias aproximaciones están en proyecto o ya en desarrollo.

Los experimentos concernientes al fondo de microondas desempeñan también aquí un papel importante. El tamaño de las manchas en la figura 14.4 —donde, una vez más, cada mancha es una región de temperatura uniforme— refleja la forma global del tejido del espacio. Si el espacio tuviera la forma de una esfera, como en la figura 8.6a, la hinchazón hacia afuera haría que las manchas fueran un poco más grandes que las de la figura 14.4b; si el espacio tuviera la forma de una silla de montar, como en la figura 8.6c, la contracción haría que las manchas fueran un poco más pequeñas; y si el espacio fuera plano, como en la figura 8.6b, el tamaño de las manchas sería intermedio. Las

medidas precisas iniciadas por COBE, y desde entonces mejoradas por WMAP, apoyan con fuerza la propuesta de que el espacio es plano. Esto no sólo encaja con las expectativas teóricas procedentes de los modelos inflacionarios, sino que también encaja perfectamente con los resultados de supernovas. Como hemos visto, un universo es-

pacialmente plano requiere que la densidad total de masa/energía sea igual a la densidad crítica. Con una contribución aproximada de un 30 por 100 de materia ordinaria y oscura, y una contribución aproximada de un 70 por 100 de energía oscura, todo encaja de forma impresionante.

Una confirmación más directa de los resultados de supernovas es el objetivo de la SuperNova/Acceleration Probe (SNAP). Propuesta por científicos del Lawrence Berkeley Laboratory, SNAP sería un telescopio a bordo de un satélite en órbita con capacidad de observar y medir un número de supernovas veinte veces mayor que el estudiado hasta ahora. No sólo podría confirmar el resultado anterior de que el 70 por 100 del universo es energía oscura, sino que también debería poder determinar más exactamente la naturaleza de la energía oscura.

Ya ve que aunque he descrito la energía oscura como si fuera una versión de la constante cosmológica de Einstein —una energía constante e invariable que empuja al espacio a expandirse— hay una posibilidad íntimamente relacionada pero alternativa. Recordemos de nuestra discusión de la cosmología inflacionaria (y de la rana que salta) que un campo cuyo valor está asentado por encima de su configuración de mínima energía puede actuar como una constante cosmológica, impulsando una expansión acelerada del espacio, pero normalmente sólo lo hará durante un corto tiempo. Antes o después el campo

encontrará su camino hasta el fondo de su cuenco de energía potencial, y el empuje hacia afuera desaparecerá. En la cosmología inflacionaria esto sucede en una minúscula fracción de segundo. Pero introduciendo un nuevo campo y escogiendo cuidadosamente su forma de energía potencial, los físicos han encontrado maneras de que la expansión acelerada sea mucho más suave en su empuje hacia afuera pero dure un tiempo mucho mayor —para que el campo impulse una fase de expansión espacial relativamente lenta y continuamente acelerada que dure no una fracción de segundo, sino miles de millones de años, a medida que el campo rueda lentamente hasta el valor de mínima energía —. Esto plantea la posibilidad de que, precisamente ahora, estemos experimentando una versión extraordinariamente suave de la ráfaga inflacionaria que se cree que ha sucedido durante los primeros momentos del universo.

La diferencia entre una verdadera constante cosmológica y la última posibilidad, conocida como *quintaesencia,* es hoy de mínima importancia, pero tiene un profundo efecto en el futuro a largo plazo del universo. Una constante cosmológica es constante —proporciona una expansión acelerada sin fin, de modo que el universo se expandirá cada vez más rápidamente y se hará cada vez más disperso, diluido y vacío—. Pero la quintaesencia proporciona una expansión acelerada que termina en algún momento, lo que sugiere un futuro mucho menos vacío y desolado que el que se sigue de una expansión acelerada que es eterna. Midiendo cambios en la aceleración del espacio durante largos períodos de tiempo (mediante observaciones de supernovas a varias distancias y, por lo tanto, en varios instantes en el pasado), SNAP puede ser capaz de distinguir entre las dos posibilidades. Determinando si la energía oscura es verdaderamente una

constante cosmológica, SNAP daría una idea sobre el destino del universo a largo plazo.

Espacio, tiempo y especulación

El viaje para descubrir la naturaleza del espacio y el tiempo ha sido largo y lleno de sorpresas; sin duda está aún en sus primeras etapas. Durante los últimos siglos hemos visto cómo un gran avance tras otro rehacen radicalmente nuestra concepción de espacio y tiempo y la rehacen de nuevo. Las propuestas teóricas y experimentales que hemos cubierto en este libro representan la comprensión que de estas ideas tiene nuestra generación, y probablemente serán una parte importante de nuestro legado científico. En el capítulo 16 discutiremos algunos de los avances más recientes y especulativos en un esfuerzo por arrojar luz sobre los que podrían ser los próximos pasos del viaje. Pero primero, en el capítulo 15, especularemos en una dirección diferente.

Aunque no hay ninguna pauta fijada para el descubrimiento científico, la historia muestra que una profunda comprensión es a menudo el primer paso hacia un control tecnológico. La comprensión de la fuerza electromagnética en el siglo xix llevó finalmente al telégrafo, la radio y la televisión. Con ese conocimiento, junto con la comprensión posterior de la mecánica cuántica, fuimos capaces de desarrollar computadores, láseres y artilugios electrónicos demasiado numerosos para mencionar. La comprensión de las fuerzas nucleares llevó al peligroso dominio de las armas más poderosas que el mundo ha conocido, y al desarrollo de tecnologías que podrían satisfacer un día todas las necesidades de energía del mundo con sólo unos vasos de agua salada. ¿Podría ser

nuestra comprensión cada vez más profunda del espacio y el tiempo el primer paso en una pauta similar de descubrimiento y desarrollo tecnológico? ¿Seremos algún día señores del espacio y el tiempo y haremos cosas que por ahora son solamente parte de la ciencia ficción?

Nadie lo sabe. Pero veamos hasta dónde hemos llegado y qué éxito podríamos tener.

15

Máquinas teleportadoras y máquinas del tiempo

Viajando a través del espacio

Quizá fuera simplemente que yo carecía de imaginación en la década de 1960, pero lo que realmente me parecía increíble era el computador de a bordo del *Enterprise.* Mis sensibilidades en la escuela primaria admitían la licencia poética de un impulso de deformación y un universo poblado por alienígenas que hablaban perfectamente en inglés. Pero ¿una máquina que podía mostrar inmediatamente —a petición— una imagen de cualquier figura histórica que hubiera vivido, dar las especificaciones técnicas de cualquier pieza de aparato construido o proporcionar acceso a cualquier libro? *Eso* ponía a prueba mi capacidad para dejar en suspenso el escepticismo. A finales de la década de 1960, ese niño estaba seguro de que nunca habría una forma de reunir, almacenar y dar acceso directo a tal riqueza de información. Y pese a todo, menos de medio siglo después, puedo sentarme aquí en mi cocina con un portátil conectado inalámbricamente a Internet, con un software de reconocimiento de voz e imitar a Kirk, hojeando un enorme almacén de conocimiento —desde lo básico a lo pueril— sin levantar un dedo. Es verdad que la velocidad y la eficiencia

de los computadores mostrados en el mundo del siglo xxııı de *Star Trek* es aún envidiable, pero es fácil imaginar que cuando llegue esa era nuestra tecnología habrá superado las expectativas imaginadas.

Este ejemplo es tan sólo uno de los muchos que han hecho un cliché de la capacidad de la ciencia ficción para presagiar el futuro. Pero ¿qué pasa con el más tentador de todos los aparatos —aquel en el que alguien entra en una cámara, mueve un interruptor y es transportado a algún lugar lejano o a un tiempo diferente? ¿Es posible que un día nos liberemos de la escasa extensión espacial y temporal en la que hemos estado confinados hasta ahora y podamos explorar los confines más lejanos del espacio y el tiempo? ¿O seguirá existiendo siempre esta diferencia entre la ciencia ficción y la realidad? Habiendo sido advertido de mi fracaso infantil en anticipar la revolución informática, usted podría cuestionar mi capacidad para adivinar los futuros avances tecnológicos. Así que en lugar de especular sobre la probabilidad de lo que puede ser, en este capítulo describiré hasta dónde hemos llegado realmente, tanto en la teoría como en la práctica, en la realización de máquinas teleportadoras y máquinas del tiempo, y lo que se tardaría en ir más allá y alcanzar el control sobre el espacio y el tiempo.

Teleportación en un mundo cuántico

En las obras de ciencia ficción convencional, una máquina *teleportadora* (o, en *Star Trek, transportadora)* examina un objeto para determinar su composición detallada y envía la información a un lugar distante, donde el objeto es reconstruido. Que el objeto sea «desmaterializado», y sus átomos y moléculas sean enviados junto con el plano para

ensamblarlos de nuevo, o que los átomos y moléculas estén ya localizados en el extremo receptor y sean utilizados para construir una réplica exacta del objeto, eso varía de una versión de ficción a otra. Como veremos, la aproximación científica a la teleportación desarrollada en la última década está más cercana en espíritu a la segunda categoría, y esto plantea dos cuestiones esenciales. La primera es un enigma filosófico estándar pero espinoso. ¿Cuándo, si alguna vez, debería una réplica exacta ser identificada, llamada, considerada o tratada como si fuera el original? La segunda es la cuestión de si es posible, siquiera en principio, examinar un objeto y determinar su composición con completa precisión de modo que podamos dibujar un plano perfecto con el que reconstruirlo.

En un universo gobernado por las leyes de la física clásica, la respuesta a la segunda pregunta sería sí. En principio, los atributos de cada partícula que constituye un objeto —la identidad, posición, velocidad y demás propiedades de cada partícula— podrían ser medidos con total precisión, transmitidos a un lugar distante y utilizados como un manual de instrucciones para recrear el objeto. Hacer esto para un objeto compuesto de más de tan sólo un puñado de partículas elementales estaría absolutamente fuera de alcance, pero en un universo clásico el obstáculo sería la complejidad, no la física.

En un universo gobernado por las leyes de la física cuántica —nuestro universo— la situación es mucho más sutil. Hemos aprendido que el acto de la medida hace que uno de la miríada de atributos potenciales de un objeto salga de la niebla cuántica y tome un valor definido. Cuando observamos una partícula, por ejemplo, los rasgos definidos que vemos no reflejan en general la mezcla cuántica borrosa de atributos que tenía un momento antes de que mirásemos.[15.1] Así, si queremos replicar un objeto, nos

enfrentamos a una Trampa-22 cuántica. Para replicar debemos observar, de modo que sepamos lo que hay que replicar. Pero el acto de observación produce un cambio, de modo que si replicamos lo que vemos, no replicaremos lo que había antes de que mirásemos. Esto sugiere que la teleportación en un universo cuántico es inalcanzable, no meramente debido a limitaciones prácticas que surgen de la complejidad, sino debido a limitaciones fundamentales inherentes a la física cuántica. No obstante, como veremos en la próxima sección, a principios de la década de 1990 un equipo internacional de físicos encontró una forma ingeniosa de evitar esta conclusión.

En cuanto a la primera cuestión, con respecto a la relación entre la réplica y el original, la física cuántica da una respuesta que es a la vez precisa y alentadora. Según la mecánica cuántica cada electrón en el universo es idéntico a todos los demás, en cuanto que tienen exactamente la misma masa, exactamente la misma carga eléctrica, exactamente las mismas propiedades en relación con las fuerzas fuerte y débil, y exactamente el mismo espín total. Además, nuestras descripciones mecanocuánticas bien comprobadas dicen que éstos *agotan* los atributos que puede tener un electrón; todos los electrones son idénticos con respecto a estas propiedades, y no hay otras propiedades que considerar. En el mismo sentido, todo quark-up es idéntico a todos los demás, todo quark-down es idéntico a todos los demás; todo fotón es idéntico a todos los demás, y así para todos los demás tipos de partículas. Como reconocieron quienes trabajaban en mecánica cuántica hace muchos años, las partículas pueden considerarse como los paquetes mínimos de un campo (e. g. los fotones son los paquetes mínimos del campo electromagnético), y la física cuántica muestra que los paquetes constituyentes mínimos del mismo campo son

siempre idénticos. (O, en el marco de la teoría de cuerdas, las partículas del mismo tipo tienen propiedades idénticas, pues son vibraciones idénticas de un único tipo de cuerdas.)

Lo que puede diferir entre las partículas del mismo tipo son las probabilidades de que estén localizadas en diversas posiciones, las probabilidades de que sus espines estén apuntando en distintas direcciones, y las probabilidades de que tengan energías y velocidades concretas. O, como los físicos dicen más sucintamente, las dos partículas pueden estar en diferentes *estados cuánticos.* Pero si dos partículas del mismo tipo están en el mismo estado cuántico —excepto, posiblemente, que una partícula tenga una alta probabilidad de estar *aquí* mientras que la otra tiene una alta probabilidad de estar *allí*— las leyes de la mecánica cuántica aseguran que son indistinguibles, no sólo en la práctica sino también en teoría. Son gemelas perfectas. Si alguien intercambiara las posiciones de las partículas (más exactamente, si intercambiara las probabilidades de las dos partículas de estar localizadas en una posición dada) no habría absolutamente ninguna forma de descubrirlo.

Así, si imaginamos que empezamos con una partícula localizada aquí,[*43] y de alguna manera colocamos otra partícula del mismo tipo exactamente en el mismo estado cuántico (mismas probabilidades para la orientación del espín, energía y demás) en una posición distante, la partícula resultante sería indistinguible de la original y el proceso sería denominado correctamente teleportación cuántica. Por supuesto, si la partícula original sobrevive intacta al proceso, usted podría estar tentado de llamar a este proceso clonación cuántica o, quizá, fax cuántico. Pero como veremos, la realización cuántica de estas ideas no conserva la partícula original —es inevitablemente modificada por el proceso de teleportación— de modo que no nos enfrentamos a este dilema taxonómico.

Una preocupación mayor, y una que los filósofos han considerado en detalle en formas diversas, es si lo que es cierto para una partícula individual lo es también para un conglomerado. Si usted fuera capaz de teleportar de un lugar a otro cada una de las partículas que constituyen su DeLorean,[*44] asegurando que el estado cuántico de cada una de ellas, incluyendo su relación con todas las demás, fuera reproducido con un 100 por 100 de fidelidad, ¿habría conseguido teleportar el vehículo? Aunque no tenemos evidencia empírica que nos guíe, el argumento teórico en apoyo de haber teleportado el automóvil es fuerte. Las configuraciones atómicas y moleculares determinan cómo se ve y siente un objeto, cómo suena y huele, e incluso cómo sabe, de modo que el vehículo resultante debería ser idéntico al DeLorean original —golpes, muescas, chirrido de la puerta izquierda, olor del perro de la familia, todo ello— y el automóvil debería tomar una curva cerrada y responder cuando se pisa a fondo el acelerador exactamente igual que lo hacía el original. La cuestión de si el vehículo es realmente el original o, más bien, es un duplicado exacto, no tiene importancia. Si usted pidiera a las Líneas Marítimas Cuánticas Unidas que llevaran su automóvil en barco desde Nueva York a Londres pero, sin que usted lo supiera, ellos lo teleportaran de la forma descrita, nunca podría advertir la diferencia, ni siquiera en teoría.

Pero ¿qué pasa si la compañía de transportes hiciera lo mismo con su gato, o si, harto de la comida de los aviones, usted decidiera hacer su viaje transatlántico por teleportación? ¿Sería el gato o la persona que sale de la cámara receptora el mismo que entró en la máquina teleportadora. Personalmente así lo creo. Una vez más, puesto que no tenemos datos relevantes, lo mejor que yo o cualquiera podemos hacer es especular. Pero, en mi opinión, un ser vivo cuyos átomos o moléculas constituyentes están

en el mismo estado cuántico que yo es yo. Incluso si el yo «original» siguiera existiendo después de haber hecho la «copia», yo (nosotros) diríamos sin duda que cada uno de nosotros era yo. Seríamos de la misma opinión —literalmente— al afirmar que ninguno de los dos tenía prioridad sobre el otro. Ideas, recuerdos, emociones y juicios tienen una base física en las propiedades atómicas y moleculares del cuerpo humano; un estado cuántico idéntico de estos constituyentes elementales debería implicar un ser consciente idéntico. Con el paso del tiempo, nuestras experiencias harían que nos fuésemos diferenciando, pero creo verdaderamente que en adelante habría dos yo, no un original que de alguna forma era «realmente» yo y una copia que de alguna forma no lo era.

De hecho, estoy dispuesto a ser un poco más vago. Nuestra composición física sufre numerosas transformaciones continuamente —algunas menores, otras drásticas— pero seguimos siendo la misma persona. Desde el Háagen-Dazs que inunda nuestro flujo sanguíneo de grasa y azúcar a la imagen por resonancia magnética que invierte la dirección de espín de varios núcleos atómicos en el cerebro, pasando por los transplantes de corazón y la liposucción, los billones de átomos en un cuerpo humano medio que son reemplazados cada millonésima de segundo, sufrimos cambios constantes, pero nuestra identidad personal permanece inalterada. Así, incluso si un ser teleportado se ajusta a mi estado físico con total exactitud, podría ser muy bien perfectamente indistinguible de mí. En mi libro, podría muy bien *ser* yo.

Ciertamente, si usted cree que hay más en la vida, y en la vida consciente en particular, que su constitución física, sus requisitos para una teleportación satisfactoria son más estrictos que los míos. Esta cuestión delicada —en qué medida está ligada nuestra identidad personal a nuestro ser

físico— ha sido debatida durante años en una variedad de formas sin ser respondida a satisfacción de todos. Aunque yo creo que toda la identidad reside en lo físico, otros discrepan, y nadie puede afirmar que tiene la respuesta definitiva.

Pero sea cual sea su punto de vista sobre la hipotética cuestión de teleportar un ser vivo, los científicos han establecido ahora que, mediante las maravillas de la mecánica cuántica, *las partículas individuales pueden ser —y lo han sido— teleportadas.*

Veamos cómo.

Entrelazamiento cuántico y teleportación cuántica

En 1997, un grupo de físicos dirigido por Antón Zeilinger, entonces en la Universidad de Innsbruck, y otro grupo dirigido por A. Francesco de Martini en la Universidad de Roma,**[15.2]** llevaron a cabo la primera teleportación con éxito de un fotón individual. En ambos experimentos, un fotón inicial en un estado cuántico particular fue teleportado una corta distancia a través de un laboratorio, pero existen todas las razones para pensar que el procedimiento hubiera funcionado igualmente a cualquier distancia. Cada grupo utilizó una técnica basada en ideas teóricas propuestas en 1993 por un equipo de físicos —Claude Bennett del Watson Research Center de IBM, Gilíes Brassard, Claude Crepeau y Richard Josza de la Universidad de Montreal, el físico israelí Asher Peres; y William Wooters del Williams College— que se basan en el entrelazamiento cuántico (capítulo 4).

Recuerde que dos partículas entrelazadas, digamos dos fotones, tienen una fuerte e íntima relación. Aunque cada una de ellas tiene solamente una cierta probabilidad de girar en un sentido u otro, y aunque cada una, cuando se

mide, parece «escoger» aleatoriamente entre las diversas posibilidades, cualquier «elección» que haga una será hecha inmediatamente también por la otra, independientemente de su separación espacial. En el capítulo 4 explicamos que no hay forma de utilizar partículas entrelazadas para enviar un mensaje de un lugar a otro a velocidad mayor que la de la luz. Si una serie de fotones entrelazados fueran medidos en lugares ampliamente separados, los datos recogidos en uno u otro detector darían una serie aleatoria de resultados (siendo compatible la frecuencia global de estar girando en un sentido u otro con las ondas de probabilidad de las partículas). El entrelazamiento sólo se haría manifiesto al comparar las dos listas de resaltados y ver, de forma notable, que eran idénticas. Pero dicha comparación requiere algún tipo de comunicación ordinaria, a velocidad menor que la de la luz. Y puesto que antes de la comparación no podía detectarse ninguna huella del entrelazamiento, no podría enviarse ninguna señal más rápida que la luz.

Sin embargo, incluso si el entrelazamiento no puede utilizarse para comunicación superlumínica, uno no puede dejar de tener la sensación de que la correlación entre partículas a gran distancia es tan extraña que tendría que ser útil para algo extraordinario. En 1993, Ben- nett y sus colaboradores descubrieron una de estas posibilidades. Demostraron que el entrelazamiento cuántico podía utilizarse para la teleportación cuántica. Quizá usted no fuera capaz de enviar un mensaje a una velocidad mayor que la de la luz, pero si se propusiera la teleportación más lenta que la luz de una partícula de un lugar a otro, el entrelazamiento es el candidato.

El razonamiento que hay tras esta conclusión, aunque matemáticamente simple, es agudo e ingenioso. He aquí

una idea de cómo procede.

Imagine que yo quiero teleportar un fotón particular, un fotón que llamaré Fotón A, desde mi casa en Nueva York a mi amigo Nicholas en Londres. Por simplicidad, veamos cómo yo hubiera teleportado el estado cuántico exacto del espín del fotón —es decir, cómo hubiera asegurado que Nicholas tendría un fotón cuyas probabilidades de girar en un sentido u otro fueran idénticas a las del Fotón A.

Yo no puedo medir simplemente el espín del Fotón A, llamar a Nicholas y decirle que manipule un fotón en su extremo de modo que su espín encaje con mi observación; el resultado que yo encuentro estaría afectado por la observación que hago, y por ello no reflejaría el verdadero estado del Fotón A antes de que yo lo mirara. De modo que ¿qué puedo hacer? Bien, según Bennett y sus colegas, el primer paso es asegurar que Nicholas y yo tenemos cada uno un miembro de un par de fotones adicionales, llamémosles Fotón B y Fotón C, que están entrelazados. Cómo obtenemos estos fotones no es particularmente importante. Supongamos simplemente que Nicholas y yo estamos seguros de que incluso si estamos en orillas opuestas del Atlántico, si yo midiera el espín del Fotón B en tomo a cualquier eje dado, y él hiciera lo mismo con el Fotón C, ambos encontraríamos exactamente el mismo resultado.

El siguiente paso, según Bennett y colaboradores, no es directamente medir el Fotón A —el fotón que espero teleportar— puesto que eso sería una intervención demasiado drástica. En lugar de ello, yo mediría una propiedad conjunta del Fotón A y el Fotón B del par entrelazado. Por ejemplo, la teoría cuántica me permite medir si el Fotón A y el Fotón B tienen el mismo espín en tomo a un eje vertical, sin medir sus espines individualmente. Análogamente, la teoría cuántica me

permite medir si los Fotones A y B tienen el mismo espín en tomo a un eje horizontal, sin medir sus espines individualmente. Con esa medida conjunta, no conozco el espín del Fotón A, pero conozco cómo está relacionado el espín del Fotón A con el del Fotón B. Y eso es información importante.

El Fotón C distante está entrelazado con el Fotón B, de modo que si yo sé cómo están relacionados el Fotón A y el Fotón B, puedo deducir cómo está relacionado el Fotón A con el Fotón C. Si ahora comunico por teléfono esta información a Nicholas, diciéndole cómo está girando el Fotón A con respecto a su fotón C, él puede determinar cómo tiene que manipular el Fotón C para que su estado cuántico coincida con el del Fotón A. Una vez que él lleva a cabo la manipulación necesaria, el estado cuántico del fotón en posesión de él será idéntico al del Fotón A, y eso es todo lo que necesitamos para declarar que el Fotón A ha sido teleportado con éxito. En el caso más simple, por ejemplo, si mi medida revelara que el espín del Fotón B es idéntico al del Fotón A concluiríamos que el espín del Fotón C es también idéntico al del Fotón A, y sin más que decir, la teleportación sería completa. El Fotón C estaría en el mismo estado cuántico que el Fotón A, como se deseaba.

Bueno, casi. Ésa es la idea aproximada, pero para explicar la teleportación cuántica en pasos tratables he dejado fuera hasta ahora un elemento de la historia absolutamente crucial, que ahora voy a introducir. Cuando llevo a cabo la medida conjunta sobre los Fotones A y B, aprendo de hecho cómo está relacionado el espín del Fotón A con el del Fotón B. Pero, como sucede con todas las observaciones, la propia medida afecta a los fotones. Por lo tanto, yo no aprendo cómo estaba relacionado el espín del Fotón A con el del Fotón B antes de la medida. En su lugar, aprendo cómo están relacionados después de que ambos

hayan sido perturbados por el acto de la medida. Por ello, a primera vista, parece que nos encontramos con el mismo obstáculo para replicar el Fotón A que describí al principio: la inevitable perturbación provocada por el proceso de medida. Hay es donde viene al rescate el Fotón C. Puesto que los Fotones B y C están entrelazados, la perturbación que yo provoqué en el Fotón B en Nueva York *se reflejará también en el estado del Fotón C en Londres.* Esa es la maravillosa naturaleza del entrelazamiento cuántico, como se desarrolló en el capítulo 4. De hecho, Bennett y sus colaboradores demostraron matemáticamente que gracias a su entrelazamiento con el Fotón B la perturbación provocada por mi medida queda impresa en el Fotón C distante.

Y eso es fantásticamente interesante. Gracias a mi medida somos capaces de aprender cómo está relacionado el espín del Fotón A con el del Fotón B, pero con el problema añadido de que ambos fotones son perturbados por mi mediación. Gracias al entrelazamiento, sin embargo, el Fotón C está ligado a mi medida —incluso si está a miles de kilómetros de distancia— y esto nos permite aislar el efecto de la perturbación y con ello tener acceso a información normalmente perdida en el proceso de medida. Si ahora yo llamo por teléfono a Nicho- las y le digo el resultado de mi medida, él aprenderá cómo están relacionados los espines de los Fotones A y B después de la perturbación, y, vía el Fotón C, tendrá acceso al impacto de la propia perturbación. Esto permite a Nicholas utilizar el Fotón C para, hablando en términos generales, restar la perturbación causada por mi medida y salvar así el obstáculo para duplicar el Fotón A. De hecho, como Bennett y sus colaboradores demuestran en detalle, con una simple manipulación del espín del Fotón C (basada en mi llamada telefónica informándole de cómo está girando el Fotón A con relación al Fotón B), Nicholas

asegurará que el Fotón C, en lo que concierne a su espín, replica exactamente el estado cuántico del Fotón A antes de mi medida. Además, aunque el espín es sólo una característica de un fotón, otras características del estado cuántico del Fotón A, tal como la probabilidad de que tenga una energía u otra) pueden ser replicadas de forma análoga.

Así, utilizando este procedimiento, podríamos teleportar el Fotón A de Nueva York a Londres.[15.3]

Como puede ver, la teleportación cuántica implica dos etapas, cada una de las cuales transmite información crítica y complementaria. Primero, hacemos una medida conjunta sobre el fotón que queremos teleportar y un miembro de un par de fotones entrelazados. La perturbación asociada con la medida queda impresa en el compañero distante del par entrelazado gracias a la extrañeza de la no localidad cuántica. Ésa es la Etapa 1, la parte específicamente cuántica del proceso de teleportación. En la Etapa 2, el resultado de la propia medida es comunicado al lugar de recepción distante mediante un medio más estándar (teléfono, fax, e-mail…) en la que podría ser llamada la parte clásica del proceso de teleportación. En combinación, la Etapa 1 y la Etapa 2 permiten que el estado cuántico exacto del fotón que queremos teleportar sea reproducido por una operación simple (tal como una rotación de cierta cantidad en tomo a ejes concretos) en el miembro distante del par entrelazado.

Nótese, también, un par de características clave de la teleportación cuántica. Puesto que el estado cuántico original del Fotón A fue perturbado por mi medida, *el Fotón C en Londres es ahora el único en dicho estado original.* No hay dos copias del Fotón A original, y por eso, más que llamar a esto fax cuántico, es más exacto llamarlo teleportación cuántica.[15.4] Además, incluso si teleportamos el Fotón A de Nueva York a Londres —incluso

si el fotón en Londres se hace indistinguible del fotón original que teníamos en Nueva York— no aprendemos el estado cuántico del Fotón A. El fotón en Londres tiene exactamente la misma probabilidad de girar en un sentido u otro que la que tenía el Fotón A antes de mi mediación, pero no sabemos cuál es esa probabilidad. De hecho, ése es el truco que subyace a la teleportación cuántica. La perturbación causada por la medida no impide determinar el estado cuántico del Fotón A, pero en la aproximación descrita, *no necesitamos saber el estado cuántico del fotón para teleportarlo.* Necesitamos saber solamente un aspecto de su estado cuántico —que aprendemos de la medida conjunta con el Fotón B—. El entrelazamiento cuántico con el Fotón C distante hace el resto.

Implementar esta estrategia para la teleportación cuántica no fue pequeña hazaña. A comienzos de la década de 1990, crear un par entrelazado de fotones era un procedimiento estándar, pero realizar una medida conjunta de dos fotones (la medida conjunta sobre los Fotones A y B descrita arriba, llamada técnicamente una *medida de estado-de- Bell)* nunca se había conseguido. La hazaña de los grupos de Zeilinger y de De Martini fue inventar técnicas experimentales ingeniosas para la medida conjunta y realizarlas en el laboratorio.**[15.5]** En 1997 habían conseguido este objetivo, convirtiéndose en los primeros grupos en conseguir la teleportación de una única partícula.

Teleportación realista

Puesto que usted y yo y un DeLorean y cualquier otra cosa estamos compuestos de muchas partículas, el siguiente paso natural es imaginar que se aplica la teleportación cuántica a estas grandes colecciones de partículas, lo que

nos permite «emitir» objetos macroscópicos de un lugar a otro. Pero el salto desde teleportar una única partícula a teleportar una colección macroscópica de partículas es espectacular, y muchísimo más allá de lo que los investigadores pueden lograr ahora y lo que muchos líderes en el campo imaginan que se puede alcanzar incluso en el futuro lejano. Pero por si acaso, he aquí cómo sueña imaginativamente Zeilinger que podríamos hacerlo algún día.

Imagine que quiero teleportar mi DeLorean de Nueva York a Londres. En lugar de hacemos cada uno, Nicholas y yo, con un miembro de un par entrelazado de fotones (lo que necesitábamos para teleportar un único fotón), cada uno de nosotros debe tener una cámara de partículas que contiene suficientes protones, neutrones, electrones y demás para construir un DeLorean, estando todas las partículas de mi cámara cuánticamente entrelazadas con todas las de la cámara de Nicholas (ver figura 15.1). Yo necesito también un aparato que mida propiedades conjuntas de todas las partículas que constituyan mi DeLorean con todas las partículas que se mueven de un lado a otro dentro de mi cámara (el análogo a medir características conjuntas de los Fotones A y B). Gracias al entrelazamiento de las partículas en las dos cámaras, el impacto de las medidas conjuntas que yo haga en Nueva

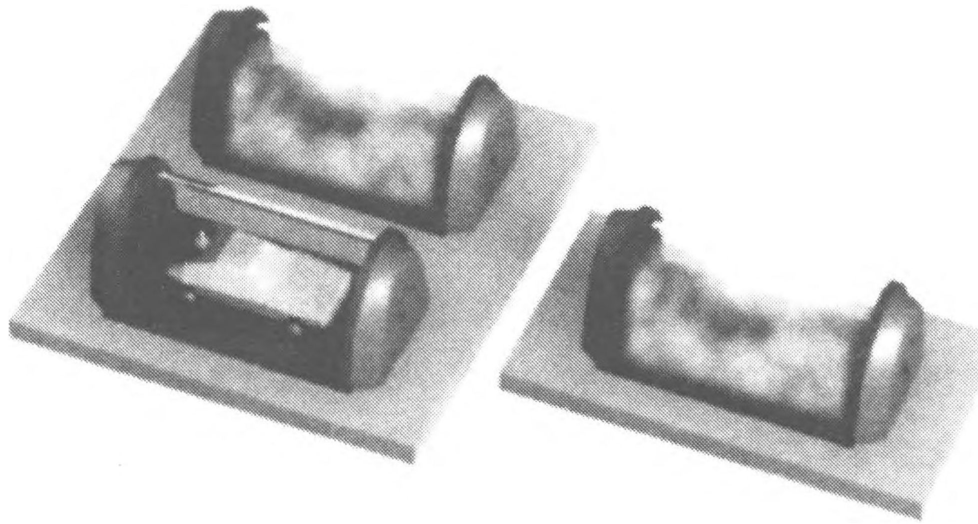


FIGURA 15.1. Una aproximación fantasiosa a la teleportación imagina que se tienen dos cámaras de partículas cuánticamente entrelazadas en lugares distantes, y un medio de realizar medidas conjuntas apropiadas de las partículas que constituyen el objeto a ser teleportado con las partículas en una de las cámaras. El resultado de estas medidas proporcionaría entonces la información necesaria para manipular las partículas de la segunda cámara para replicar el objeto, y completar la teleportación.

York quedará impreso en la cámara de partículas de Nicholas en Londres (el análogo al estado del Fotón C que refleja la medida conjunta en A y B). Si yo llamo a Nicholas y le comunico los resultados de mis medidas (sería una llamada costosa, pues tendré que dar a Nicholas unos $1O^{30}$ resultados), los datos le informarán de cómo tiene que manipular las partículas en su cámara (igual que en mi llamada telefónica anterior le informaba de cómo tenía que manipular el Fotón C). Cuando él acabe, cada partícula de su cámara estará exactamente en el mismo estado cuántico que cada partícula en el DeLorean (antes de que fuera sometida a cualquier medida) y así, como en nuestra

discusión anterior, Nicholas *tendrá* ahora el DeLorean. [*45] Su teleportación de Nueva York a Londres será completa.

Note, no obstante, que hoy por hoy cualquier paso en esta versión macroscópica de la teleportación cuántica es pura fantasía. Un objeto tal como un DeLorean tiene mucho más de 1.000 cuatrillones de partículas. Aunque los experimentadores están ganando facilidad para entrelazar más de un único par de partículas, están extraordinariamente lejos de llegar a los números relevantes para entidades macroscópicas.[15.6] Conseguir las dos cámaras de partículas entrelazadas está así absolutamente fuera del alcance actual. Además, la medida conjunta de *dos* fotones era, en sí misma, una hazaña difícil e impresionante. Extender esto a una medida conjunta de trillones de partículas es hoy por hoy inimaginable. Desde nuestro punto de vista actual, una valoración desapasionada concluiría que teleportar un objeto macroscópico, al menos de la manera hasta ahora utilizada para una única partícula, está a eones de tiempo, si no a una eternidad.

Pero, puesto que una constante en la ciencia y la tecnología es la superación de profecías, yo señalaré simplemente lo obvio: la teleportación de cuerpos macroscópicos parece poco probable. Pero ¿quién sabe? Hace cuarenta años el computador del *Enterprise* también parecía totalmente improbable.[15.7]

Los enigmas del viaje en el tiempo

No hay que negar que la vida sería diferente si la teleportación de objetos macroscópicos fuera tan fácil como llamar a SEUR o subir a un metro. Viajes impracticables o imposibles se harían accesibles, y el concepto de viaje a

través del espacio quedaría revolucionado hasta ese grado en que un salto en conveniencia y viabilidad marca un cambio fundamental en la visión del mundo.

Incluso así, el impacto de la teleportación en nuestra idea del universo palidecería en comparación con la convulsión que traería el conseguir un viaje voluntario a través del tiempo. Todo el mundo sabe que con esfuerzo y dedicación suficiente podemos, al menos en principio, ir de aquí a allí. Aunque hay limitaciones tecnológicas en nuestros viajes a través del espacio, dentro de dichas limitaciones nuestros viajes están guiados por la elección y el capricho. Pero ¿ir de ahora a entonces? Nuestras experiencias atestiguan abrumadoramente que sólo hay una ruta: debemos esperar —un segundo debe seguir a otro hasta que el ahora cede metódicamente el lugar al entonces —. Y esto supone que «entonces» es posterior a «ahora». Si entonces precede a ahora, la experiencia dicta que no hay ninguna ruta; viajar al pasado no parece una opción. A diferencia de los viajes a través del espacio, los viajes a través del tiempo parecen todo lo contrario de una cuestión de elección y capricho. Cuando se trata del tiempo, nos vemos arrastrados en una dirección, ya lo queramos o no.

Si fuéramos capaces de navegar en el tiempo tan fácilmente como navegamos en el espacio, nuestra visión del mundo no sólo cambiaría, sino que sufriría el cambio más dramático en la historia de nuestra especie. A la luz de un impacto tan innegable, no deja de sorprenderme que pocas personas se dan cuenta de que los soportes teóricos para un tipo de viaje en el tiempo —viaje en el tiempo al futuro— han existido desde principios del siglo pasado.

Cuando Einstein descubrió la naturaleza del espaciotiempo de la relatividad especial, trazó un plano para ir hacia el futuro. Si usted quiere ver lo que está sucediendo en el planeta Tierra 1.000 o 10.000 o 10

millones de años en el futuro, las leyes de la física einsteiniana nos dicen cómo hacerlo. Usted construye un vehículo cuya velocidad puede alcanzar, digamos, un 99,9999999996 por 100 de la velocidad de la luz. A todo tren usted se encamina hacia el espacio profundo durante un día, o diez días, o un poco más de 27 años según el reloj de su nave, luego vira de golpe y se dirige de vuelta a la Tierra, de nuevo a todo tren. A su regreso, *habrán* transcurrido 1.000 o 10.000 0 10 millones de años de tiempo terrestre. Ésta es una predicción indiscutida y experimentalmente verificada de la relatividad especial; es un ejemplo del frenado del tiempo con el aumento de la velocidad descrito en el capítulo 3.**[15.8]** Por supuesto, puesto que vehículos de semejante velocidad están más allá de lo que podemos construir, nadie ha comprobado estas predicciones literalmente. Pero como discutimos antes, los investigadores han confirmado el frenado predicho del tiempo en el caso de un avión comercial, que viaja a una pequeña fracción de la velocidad de la luz, así como el de las partículas elementales como los muones que viajan en los aceleradores a una velocidad muy próxima a la de la luz (los muones en reposo se desintegran en otras partículas en aproximadamente dos millonésimas de segundo, pero cuanto más veloces viajan más lento es el tictac de su reloj interno, y por eso más tiempo parecen vivir los muones). Hay todas las razones para creer, y ninguna razón para no creer, que la relatividad especial es correcta, y su estrategia para alcanzar el futuro funcionaría como se predice. La tecnología, y no la física, nos mantiene a todos nosotros atados a esta época. **[*46]**

Surgen cuestiones espinosas, no obstante, cuando pensamos en el otro tipo de viaje en el tiempo, el viaje al pasado. Sin duda usted está familiarizado con algunas de ellas. Por ejemplo, existe el escenario estándar en el que

usted viaja al pasado e impide su propio nacimiento. En muchas descripciones de ficción esto se logra con violencia; sin embargo, cualquier intervención menos drástica pero igualmente efectiva —tal como impedir que sus padres se conozcan— también serviría. La paradoja es clara: si usted no hubiera nacido, ¿cómo llegó a ser y, en particular, cómo viajó al pasado e impidió que sus padres se conocieran? Para viajar al pasado y separar a sus padres, usted tendría que haber nacido; pero si hubiera nacido, viajado al pasado y mantenido a sus padres separados, usted *no habría* nacido. Tropezamos directamente con un impasse lógico.

Una paradoja similar, sugerida por el filósofo de Oxford Michael Dummett y subrayada por su colega David Deutsch, retuerce el cerebro de una forma ligeramente diferente, quizá aún más desconcertante. He aquí una versión. Imagine que yo construyo una máquina del tiempo y viajo diez años al futuro. Tras un rápido almuerzo en Tofu- 4-U (la cadena que reemplazó a MacDonald’s después de que la gran pandemia de las vacas locas hiciese caer el entusiasmo por las hamburguesas), entro en el cibercafé más cercano y me conecto on line para ver qué progresos se han hecho en teoría de cuerdas. Y me encuentro con una magnífica sorpresa. Leo que todas las cuestiones abiertas en teoría de cuerdas han sido resueltas. La teoría ha sido completamente desarrollada y utilizada con éxito para explicar todas las propiedades de las partículas conocidas. Se ha encontrado evidencia incontrovertible de las dimensiones extras, y se han confirmado las predicciones de la teoría de partículas supersimétricas asociadas — sus masas, cargas eléctricas y demás— en el Gran Colisionador de Hadrones. Ya no hay ninguna duda: la teoría de cuerdas es la teoría unificada del universo.

Cuando profundizo un poco más para ver quién es el responsable de estos grandes avances, tengo una sorpresa

aún mayor. El artículo fundamental fue escrito un año antes por no otra persona que Rita Green. Mi madre. Quedo conmocionado. No pretendo ser irrespetuoso: mi madre es una persona maravillosa, pero no es una científica, no puede entender por qué alguien sería un científico y, por ejemplo, sólo leyó unas pocas páginas de *El universo elegante* antes de dejarlo, diciendo que le daba dolor de cabeza. De modo que ¿cómo diantres podía haber escrito el artículo clave en teoría de cuerdas? Bien, leo su artículo on line, me desconcierta el razonamiento sencillo pero profundamente intuitivo, y veo que al final ella *me* agradece los años de intensa formación en matemáticas y física después de que un seminario de Tony Robbins le persuadiera para superar sus temores y seguir a su física interior. Vaya, pienso yo. Ella se acababa de matricular en ese seminario cuando yo me embarqué en mi viaje al futuro. Mejor será que me vuelva a mi propio tiempo para empezar la formación.

Bien, vuelvo en el tiempo y empiezo a instruir a mi madre en teoría de cuerdas. Pero eso no va bien. Pasa un año. Luego dos. Y aunque ella lo está intentando arduamente, no lo consigue. Empiezo a preocuparme. Seguimos con ello durante otro par de años, pero el progreso es mínimo. Ahora estoy realmente preocupado. No queda mucho tiempo para la supuesta fecha de aparición de su artículo. ¿Cómo va a escribirlo? Finalmente tomo una gran decisión. Cuando leo su artículo en el futuro, deja tal impresión en mí que lo recuerdo claro como el día. Y así, en lugar de que ella lo descubra por sí misma —algo que está pareciendo cada vez menos probable— le digo lo que tiene que escribir, asegurando que ella incluye todo exactamente como yo recuerdo haberlo leído. Ella envía el artículo, e inmediatamente pone en ascuas al mundo de la física. Todo

lo que yo leo durante mi estancia en el futuro llega a suceder.

Ahora, he aquí la cuestión enigmática. ¿Quién debería recibir el crédito por el artículo fundamental de mi madre? Yo no debería. Yo conocí los resultados leyéndolos en su artículo. Pero ¿cómo puede recibir mi madre el crédito, cuando ella escribió sólo lo que yo le conté? Por supuesto, aquí no se trata en realidad de crédito —se trata de la procedencia del nuevo conocimiento, las nuevas intuiciones y la nueva comprensión que presenta el artículo de mi madre—. Adonde puedo apuntar y decir: «Esta persona o este computador dieron con los nuevos resultados». Yo no tuve las ideas, ni las tuvo mi madre, no había nadie más involucrado, y no utilizamos un computador. Sin embargo, estos brillantes resultados están de algún modo en su artículo. Aparentemente, en un mundo que permite el viaje en el tiempo tanto hacia el futuro como hacia el pasado el conocimiento puede materializarse a partir del aire. Aunque no es tan paradójico como impedir el propio nacimiento, es decididamente extraño.

¿Qué deberíamos hacer con tal paradoja y extrañeza? ¿Deberíamos concluir que aunque el viaje en el tiempo al futuro está permitido por las leyes de la física, cualquier intento de regresar al pasado debe fracasar? Algunos ciertamente lo han pensado. Pero, como veremos ahora, hay maneras de evitar las cuestiones difíciles a las que llegamos. Esto no significa que el viaje al pasado sea posible —eso es una cuestión separada que consideraremos pronto— pero sí demostrará que el viaje hacia atrás en el tiempo no puede ser descartado apelando simplemente a los rompecabezas que acabamos de discutir.

Replanteando los rompecabezas

Recordemos que en el capítulo 5 discutimos el flujo del tiempo, desde la perspectiva de la física clásica, y llegamos a una imagen que difiere sustancialmente de nuestra imagen intuitiva. Una reflexión cuidadosa nos llevó a concebir el espaciotiempo como un bloque de hielo con cada instante congelado para siempre, frente a la imagen familiar del tiempo como un río que nos arrastra hacia delante desde un instante al siguiente. Estos momentos congelados están agrupados en *ahoras* —en sucesos que ocurren al mismo tiempo— de diferentes maneras por observadores en diferentes estados de movimiento. Y para acomodar esta flexibilidad de rebanar el bloque espaciotemporal en diferentes nociones de ahora, acudíamos también a una metáfora equivalente en la que el espaciotiempo se ve como una barra de pan que puede ser rebanada a ángulos diferentes.

Pero independientemente de la metáfora, la lección del capítulo 5 es que instantes —los sucesos que constituyen la barra del espacio- tiempo— simplemente son. Son intemporales. Cada instante —cada suceso u ocurrencia— existe, de la misma forma que existe cada punto en el espacio. Los instantes no nacen momentáneamente cuando son iluminados por el «foco» del presente de un observador; esa imagen se ajusta a nuestra intuición pero no puede resistir un análisis lógico. En lugar de ello, una vez iluminado, siempre iluminado. Los instantes no cambian. Los instantes son. Ser iluminado es simplemente una de las muchas características inmutables que constituyen un instante. Esto es particularmente evidente desde la perspectiva intuitiva aunque imaginaria de la figura 5.1, en la que están a la vista todos los sucesos que constituyen la historia del universo; todos están allí estáticos e inmutables. Observadores diferentes no coinciden en cuáles de los sucesos ocurren en el mismo instante —ellos rebanan la

barra del espaciotiempo a ángulos diferentes— pero la barra total y sus sucesos constituyentes son literalmente universales.

La mecánica cuántica ofrece ciertas modificaciones a esta perspectiva clásica sobre el tiempo. Por ejemplo, vimos en el capítulo 12 que en escalas extraordinariamente cortas, el espacio y el espacio- tiempo se hacen inevitablemente ondulados y bacheados. Pero (capítulo 7), una valoración completa de la mecánica cuántica y del tiempo requiere una resolución del problema de la medida cuántica. Una de las propuestas para hacerlo, la interpretación de los Muchos Mundos, es particularmente relevante para tratar las paradojas que surgen del viaje en el tiempo, y las abordaremos en la próxima sección. Pero en esta sección, sigamos clásicos y traigamos la representación bloque de hielo/barra de pan del espaciotiempo para tratar estos rompecabezas.

Tomemos el ejemplo paradójico de que usted ha vuelto atrás en el tiempo y ha impedido que sus padres se conozcan. Intuitivamente, todos sabemos lo que se supone que esto significa. Antes de que usted viajara al pasado, sus padres se habían conocido —digamos en las campanadas de medianoche del 31 de diciembre de 1965,[*47] en una fiesta de Año Nuevo— y, en su momento, su madre le da a luz. Luego, muchos años más tarde, usted decide viajar al pasado —de vuelta al 31 de diciembre de 1965— y una vez allí usted cambia las cosas; en particular, usted mantiene a sus padres alejados, impidiendo su propia concepción y nacimiento. Pero ahora enfrentamos esta descripción intuitiva con la representación del tiempo como barra espaciotemporal argumentada con más detalle.

En esencia, la descripción intuitiva no tiene sentido porque supone que los instantes pueden cambiar. La imagen intuitiva imagina que el inicio de las campanadas de

la medianoche del 31 de diciembre de 1965 (utilizando el rebanamiento temporal estándar en la Tierra) es «inicialmente» el instante en que se encuentran sus padres, pero imagina además que su interferencia cambia «posteriormente» las cosas de modo que en las campanadas de medianoche del 31 de diciembre de 1965 sus padres están a kilómetros de distancia, si no en continentes separados. El problema con esta nueva narración de los sucesos, no obstante, es que los instantes no cambian; como hemos visto, simplemente son. La barra espaciotemporal existe, fija e invariable. No tiene sentido que un instante sea «incialmente» de una manera y «posteriormente» sea de otra manera.

Si usted viajó en el tiempo de vuelta al 31 de diciembre de 1965, entonces usted estaba allí, estuvo allí siempre, estará allí siempre, nunca dejó de estar allí. El 31 de diciembre de 1965 no sucedió dos veces, sin que usted estuviese en el debut pero asistiese al bis. Desde la perspectiva intemporal de la figura 5.1, usted existe —estático e invariable— en varias localizaciones en la barra espaciotemporal. Si hoy usted coloca los botones de su máquina del tiempo para que le envíen a las 23.50, del 31 de diciembre de 1965, entonces este último instante estará entre las localizaciones en la barra espaciotemporal en las que usted puede ser encontrado. Pero su presencia en la Nochevie- ja de 1965 será una característica eterna e inmutable del espacio- tiempo.

Esta idea nos sigue llevando a algunas conclusiones extrañas, pero evita las paradojas. Por ejemplo, usted aparecería en la barra espacio- temporal a las 23.50, del 31 de diciembre de 1965, pero antes de ese momento no habría ningún registro de su existencia. Esto es extraño, pero no paradójico. Si alguien le viera aparecer de repente a las 23.50, y le preguntara, con pánico en los ojos, de dónde

venía, usted podría responder tranquilamente: «Del futuro». En este escenario, al menos hasta ahora, no hemos caído en un impasse lógico. Donde las cosas se hacen más interesantes, por supuesto, es cuando usted trata de llevar a cabo su misión e impedir que sus padres se conozcan. ¿Qué sucede? Bien, manteniendo cuidadosamente la perspectiva de «bloque espaciotemporal», concluimos inevitablemente que usted no puede tener éxito. No importa lo que haga en esa fatídica Nochevieja, usted fracasará. Mantener a sus padres separados —aunque parece estar dentro del ámbito de las cosas que usted puede hacer— equivale en realidad a un rompecabezas lógico. Sus padres se encontraron en las campanadas de medianoche. Usted estuvo allí. Y usted estará «siempre» allí. Cada instante simplemente es; no cambia. Aplicar el concepto de cambio a un instante tiene tanto sentido como someter a una piedra a un psicoanálisis. Sus padres se conocieron en las campanadas de medianoche del 31 de diciembre de 1965, y nada puede cambiar eso porque su encuentro es un suceso inmutable, invariable, que ocupa eternamente su lugar en el espaciotiempo.

De hecho, ahora que usted piensa en ello recuerda que en algún momento de su adolescencia, cuando usted preguntó a su padre cómo se declaró a su madre, él le dijo que no había planeado declararse en absoluto. Apenas había conocido a su madre antes de plantearle la gran pregunta. Pero aproximadamente diez minutos antes de Noche- vieja en una fiesta de Año Nuevo, se asustó tanto al ver aparecer de repente a un hombre de ninguna parte —un hombre que decía ser del futuro— que cuando conoció a su madre decidió declararse directamente.

La cuestión es que el conjunto completo e invariable de sucesos en el espaciotiempo necesariamente encaja en un todo coherente y auto- consistente. El universo tiene

sentido. Si usted viaja en el tiempo de vuelta al 31 de diciembre de 1965, está realmente cumpliendo su propio destino. En la barra espaciotemporal hay alguien presente a las 23.50, del 31 de diciembre de 1965, que no está allí en ningún instante anterior. Desde la perspectiva exterior imaginaria de la figura 5.1, podríamos ver esto directamente: también veríamos, innegablemente, que la persona es usted en su edad actual. Para que estos sucesos, situados hace décadas, tengan sentido, usted debe viajar en el tiempo de vuelta a 1965. Y lo que es más, desde nuestra perspectiva exterior podemos ver a su padre haciéndole una pregunta inmediatamente después de las 23.50, del 31 de diciembre de 1965, quedando aterrorizado, echando a correr y encontrando a su madre a medianoche; un poco más a lo largo de la barra, podemos ver la boda de sus padres, su nacimiento, su infancia posterior y, más tarde, su entrada en la máquina del tiempo. Si el viaje en el tiempo hacia el pasado fuera posible, ya no podríamos explicar los sucesos en un instante solamente en términos de sucesos en instantes anteriores (desde ninguna perspectiva dada) pero la totalidad de los sucesos constituirían necesariamente una historia razonable, coherente y no contradictoria.

Como se ha subrayado en la última sección, esto no significa, por mucho que forcemos la imaginación, que el viaje en el tiempo al pasado sea posible. Pero sí sugiere con fuerza que las pretendidas paradojas, tales como impedir su propio nacimiento, nacen de fallos lógicos. Si usted viaja en el tiempo al pasado, no puede cambiarlo como no puede cambiar el valor de pi. Si usted viaja al pasado, está, estará, y siempre formará parte del pasado, el mismísimo pasado que lleva a que usted viaje a él.

Desde la perspectiva exterior de la figura 5.1, esta explicación es firme y coherente. Examinando la totalidad

de sucesos en la barra del espaciotiempo vemos que están entrelazados con la rígida economía de un crucigrama cósmico. Declaré antes que incluso si usted puede estar decidido a impedir que sus padres se conozcan, no puede tener éxito en la aproximación clásica a este problema. Usted puede observar que se encuentran. Incluso puede facilitar su encuentro, quizá sin quererlo como en la historia que acabo de contar. Usted puede viajar hacia atrás en el tiempo repetidamente, de modo que hay muchos usted presentes en cada intento de impedir el encuentro de sus padres. Pero tener éxito en impedir que sus padres se encuentren sería cambiar algo con respecto a lo cual el concepto de cambio carece de sentido.

Pero, incluso con la idea de estas observaciones abstractas, no podemos dejar de preguntar: ¿qué le impide tener éxito? Si usted está en la fiesta a las 23.50 y ve a su madre de joven, ¿qué le impide llevarse a su madre? O si ve a su padre de joven, ¿qué le impide —¡oh, qué caray!, digámoslo claramente— pegarle un tiro? ¿No tiene usted libre albedrío? Aquí es donde, algunos sospechan, puede intervenir la mecánica cuántica.

Libre albedrío, muchos mundos y viaje en el tiempo

El libre albedrío es una cuestión complicada, incluso sin el factor de complicación que introduce el viaje en el tiempo. Las leyes de la física clásica son deterministas. Como vimos antes, si usted conociera exactamente cómo son las cosas ahora (la posición y la velocidad de cada partícula en el universo), las leyes de la física clásica le dirían exactamente cómo fueron las cosas o cómo serían en cualquier otro instante que usted especificara. Las ecuaciones son indiferentes a la supuesta libertad de la voluntad humana.

Algunos han considerado que esto significa que en un universo clásico el libre albedrío sería una ilusión. Usted está hecho de un conjunto de partículas, de modo que si las leyes de la física clásica pudieran determinar todo sobre sus partículas en cualquier instante —dónde estaban, cómo se movían y demás— su capacidad voluntaria para decidir sus acciones aparecería muy comprometida. Este razonamiento me convence, pero los que creen que somos más que la suma de nuestras partículas quizá estén en desacuerdo.

En cualquier caso, la relevancia de estas observaciones es limitada, puesto que el nuestro es un universo cuántico, no clásico. En física cuántica, la física del mundo real, hay similitudes con esta perspectiva clásica; también hay diferencias potencialmente fundamentales. Como usted leyó en el capítulo 7, si conoce la función de onda cuántica precisamente ahora para cada partícula en el universo, la ecuación de Schródinger le dice cómo era o será en cualquier otro instante que usted especifique. Esta componente de la física cuántica es completamente determinista, igual que en física clásica. Sin embargo, el acto de observación complica la historia mecanocuántica y, como hemos visto, calienta aún más el debate sobre el problema de la medida cuántica. Si los físicos concluyen un día que la ecuación de Schródinger es todo lo que hay en la mecánica cuántica, entonces la física cuántica, en su totalidad, sería en todo tan determinista como la física clásica. Como sucede con el determinismo clásico, algunos dirían que esto significa que el libre albedrío es una ilusión, y otros no. Pero si actualmente estamos pasando por alto parte de la teoría cuántica —si el paso de probabilidades a resultados definidos requiere algo más allá del marco cuántico estándar— es cuando menos posible que el libre albedrío pudiera hallar una realización concreta dentro de la ley física. Quizá encontremos algún día, como han

conjeturado algunos físicos, que el acto de observación consciente es un elemento integrante de la mecánica cuántica, siendo el catalizador que hace que se realice un resultado a partir de la niebla cuántica.[15.9] Personalmente encuentro esto demasiado improbable, pero no conozco ninguna manera de descartarlo.

El resultado es que el estatus del libre albedrío y su papel dentro de la ley física fundamental sigue sin estar resuelto. De modo que consideremos las dos posibilidades: que el libre albedrío sea ilusorio y que el libre albedrío sea real.

Si el libre albedrío es una ilusión, y el viaje en el tiempo al pasado es posible, entonces su incapacidad para impedir que sus padres se conozcan no plantea ningún enigma. Aunque usted sienta que tiene control sobre sus actos, las leyes de la física son las que realmente pulsan las cuerdas. Cuando usted va a llevarse a su madre o a matar a su padre, las leyes de la física se ponen en medio. Le máquina del tiempo le deja en el lado equivocado de la ciudad y usted llega después de que sus padres se hayan conocido; o usted aprieta el gatillo y la pistola se encasquilla; o aprieta el gatillo pero yerra el blanco y en su lugar le da al único competidor de su padre por la mano de su madre, allanando el camino para su unión; o, quizá, cuando usted sale de la máquina del tiempo ya no tiene ganas de impedir que sus padres se conozcan. Independientemente de sus intenciones cuando entra en la máquina del tiempo, sus actos cuando sale son parte de la historia consistente del espaciotiempo. Las leyes de la física triunfan sobre todos los intentos de frustrar la lógica.Todo lo que usted hace encaja perfectamente. Siempre lo ha hecho y siempre lo hará. Usted no puede alterar lo inalterable.

Si el libre albedrío no es una ilusión, y el viaje al pasado es posible, la física cuántica da sugerencias alternativas para lo que puede suceder, y es característicamente

diferente de la formulación basada en la física clásica. Una propuesta particularmente atractiva, defendida por Deutsch, hace uso de la interpretación de los Muchos Mundos de la mecánica cuántica. Recuerde del capítulo 7 que en el marco de los Muchos Mundos cada resultado potencial encarnado en una función de onda cuántica —el giro de una partícula en uno u otro sentido, el que otra partícula esté aquí o allí— se realiza en su propio universo paralelo e independiente. El universo del que somos conscientes en un instante dado es tan sólo uno de un número infinito en el que cada posible evolución permitida por la física cuántica se realiza por separado. En este marco es tentador sugerir que la libertad que sentimos al tomar una u otra decisión refleja la posibilidad que tenemos de entrar en uno u otro universo paralelo en un instante posterior. Por supuesto, puesto que hay infinitas copias de usted y yo salpicadas en los universos paralelos, los conceptos de identidad personal y de libre albedrío tienen que ser interpretados en este contexto más amplio.

Por lo que concierte al viaje en el tiempo y las paradojas potenciales, la interpretación de los Muchos Mundos sugiere una nueva solución. Cuando usted viaja a las 23.50 del 31 de diciembre de 1965, saca su arma, apunta a su padre y aprieta el gatillo, la pistola funciona y usted le da al blanco pretendido. Pero puesto que esto no es lo que sucedió en el universo en el que usted se embarcó en su odisea de viaje en

el tiempo, su viaje debe haber sido no sólo a través del tiempo, *debe haber sido también de un universo paralelo a otro.* El universo paralelo en el que usted se encuentra ahora es uno en el que sus padres nunca se conocieron —un universo que la interpretación de los Muchos Mundos nos asegura que está ahí (puesto que cada posible universo compatible con las leyes de la mecánica cuántica está ahí)

—. Y así, en esta aproximación, no nos enfrentamos a ninguna paradoja lógica porque hay varias versiones de un instante dado, cada una de ellas situada en un universo paralelo diferente; en la interpretación de los Muchos Universos, es como si hubiera infinitas barras espaciotempo- rales, no sólo una. En el universo de origen sus padres se encontraron el 31 de diciembre de 1965, usted nació, creció, le guardó rencor a su padre, se fascinó con el viaje en el tiempo y se embarcó en un viaje al 31 de diciembre de 1965. En el universo en el que usted llega, su padre es asesinado el 31 de diciembre de 1965, antes de conocer a su madre, por un pistolero que afirma ser su hijo procedente del futuro. En ese universo nunca ha nacido una versión de usted, pero es perfecto, puesto que el usted que apretó el gatillo no tiene padres. Resulta simplemente que ellos viven en un universo paralelo diferente. Si alguien en este universo cree su historia o, por el contrario, le ve como un loco delirante, eso no puedo decirlo. Pero lo que está claro es que en cada universo —el que usted dejó y el universo en el que entró— evitamos situaciones contradictorias.

Y lo que es más, incluso en este contexto ampliado, su expedición de viaje en el tiempo no cambia el pasado. En el universo que usted dejó, eso es evidente, puesto que nunca visita su pasado. En el universo en el que entra, su presencia a las 23.50 del 31 de diciembre de 1965 no cambia ese instante: en ese universo usted estaba, y siempre estará, presente en dicho instante. Una vez más, en la interpretación de los Muchos Mundos, cada secuencia físicamente consistente de sucesos ocurre en uno de los universos paralelos. El universo en el que usted entra es uno en el que las acciones criminales que usted decide emprender se realizan. Su presencia el 31 de diciembre de

1965, y todo el desbarajuste que crea, son parte del tejido invariable de la realidad del universo.

La interpretación de los Muchos Mundos ofrece una solución similar para la cuestión del conocimiento que aparentemente se materializa de la nada, como en el escenario de mi madre escribiendo un artículo decisivo sobre teoría de cuerdas. Según la interpretación de los Muchos Mundos, en uno de la miríada de universos paralelos mi madre se convierte rápidamente en una experta en teoría de cuerdas, y descubre por sí misma todo lo que yo leo en su artículo. Cuando yo emprendo mi excursión al futuro, mi máquina del tiempo me lleva a *ese* universo. Los resultados que leo en el artículo de mi madre mientras estoy allí fueron realmente descubiertos por la versión de mi madre en ese universo. Luego, cuando viajo de vuelta en el tiempo, entro en otro de los universos paralelos, uno en el que mi madre tiene dificultades para entender la física. Tras años de tratar de enseñarle, me rindo y finalmente le digo lo que tiene que escribir en el artículo. Pero en este escenario no hay ningún enigma respecto a quién es responsable de la idea fundamental. La descubridora es la versión de mi madre en el universo en el que ella es un genio de la física. Todo lo que sucedió como resultado de mis diversos viajes en el tiempo es que sus descubrimientos son comunicados a una versión de sí misma en otro universo paralelo. Suponiendo que usted encuentra los universos paralelos más fáciles de tragar que los descubrimientos sin autor —una proposición discutible— esto proporciona una explicación menos desconcertante del intercambio de conocimiento y el viaje en el tiempo.

Ninguna de las propuestas que hemos discutido en esta sección o en la anterior es necesariamente la solución a los enigmas y paradojas del viaje en el tiempo. Más bien, estas propuestas pretenden demostrar que enigmas y paradojas

no descartan el viaje en el tiempo hacia el pasado puesto que, con nuestro estado actual de conocimiento, la física ofrece posibles caminos para rodear los problemas. Pero no descartar algo no es ni mucho menos declararlo posible. Así que ahora nos vemos llevados a la pregunta importante:

¿Es posible el viaje en el tiempo al pasado?

La mayoría de los físicos responderían que no. Pero a diferencia del no definitivo que usted obtendría si preguntara si la relatividad especial permite que un objeto masivo se acelere y supere la velocidad de la luz, o si la teoría de Maxwell permite que una partícula con una unidad de carga eléctrica se desintegre en partículas con dos unidades de carga eléctrica, éste es un no matizado.

El hecho es que nadie ha demostrado que las leyes de la física descarten absolutamente el viaje en el tiempo dirigido al pasado. Por el contrario, algunos físicos incluso han establecido instrucciones hipotéticas de cómo una civilización con proezas tecnológicas ilimitadas, que operan completamente dentro de las leyes de la física conocidas, podría llegar a construir una máquina del tiempo (cuando hablamos de máquinas del tiempo, queremos decir algo que es capaz de viajar tanto hacia el futuro como al pasado). Las propuestas no guardan ningún parecido con el artilugio giratorio descrito por H. G. Wells o con el DeLorean trucado de Doc Brown. Y todos los elementos del diseño superan los límites de la física conocida, lo que lleva a muchos investigadores a sospechar que con posteriores refinamientos en nuestra comprensión de las leyes de la Naturaleza, las propuestas actuales y futuras para máquinas del tiempo serán estimadas más allá de los límites de lo que es físicamente posible. Pero hoy por hoy, la sospecha se

basa en sensaciones viscerales y pruebas circunstanciales, no en pruebas sólidas.

El propio Einstein, durante la década de intensa investigación que llevó a la publicación de su teoría de la relatividad general, reflexionó sobre la cuestión del viaje al pasado.[15.10] Francamente, hubiera sido extraño que no lo hiciera. Puesto que su radical replanteamiento del espacio y el tiempo desechaba un dogma largo tiempo aceptado, una pregunta siempre presente era hasta dónde llegaría la convulsión. ¿Qué características, si hubiera alguna, del tiempo intuitivo, cotidiano y familiar sobrevivirían? Einstein nunca escribió mucho sobre la cuestión del viaje en el tiempo porque, según su propia explicación, nunca hizo muchos progresos. Pero en las décadas posteriores a la difusión de su artículo sobre la relatividad general, de forma lenta pero segura, otros físicos lo hicieron.

Entre los primeros artículos sobre la relatividad general con relevancia para las máquinas del tiempo estaban los escritos en 1937 por el físico escocés W. J. van Stockum[15.11] y en 1949 por un colega de Einstein en el Instituto de Estudio Avanzado, Kurt Godel. Van Stoc- kum estudió un hipotético problema en relatividad general en el que un cilindro muy denso e infinitamente largo se pone en movimiento giratorio en tomo a su eje (infinitamente) largo. Aunque un cilindro infinito no es físicamente realista, el análisis de Van Stockum llevaba a una revelación interesante. Como vimos en el capítulo 14, los objetos masivos en rotación arrastran al espacio en un remolino. En este caso, el remolino es tan importante que, como muestra el análisis matemático, no sólo el espacio sino también el tiempo quedaría atrapado en el remolino. Hablando en términos generales, la rotación retuerce la dirección del tiempo, de modo que el movimiento circular alrededor del cilindro le lleva al pasado. Si su nave espacial rodea al

cilindro, usted puede volver al punto de partida en el espacio *antes* de que usted emprenda su viaje. Ciertamente, nadie puede construir un cilindro giratorio infinitamente largo, pero este trabajo era un primer indicio de que quizá la relatividad general no prohíba el viaje en el tiempo al pasado.

El artículo de Godel también investigaba una situación que incluía un movimiento rotacional. Pero en lugar de centrarse en un objeto rotatorio en el espacio, Godel estudió lo que sucede si todo el espacio sufre un movimiento de rotación. Mach hubiera considerado esto absurdo. Si el universo entero está rotando, entonces no hay nada con respecto a lo cual se está dando la pretendida rotación. Mach concluiría que un universo en rotación y un universo en reposo son uno y el mismo. Pero éste es otro ejemplo en el que la relatividad general no se ajusta totalmente a la concepción relacional del espacio. Según la relatividad general, tiene sentido hablar de la rotación del universo entero, y con esta posibilidad llegan simples consecuencias observacionales. Por ejemplo, si usted dispara un láser en un universo en rotación, la relatividad general muestra que parecerá viajar a lo largo de una trayectoria espiral antes que en línea recta (algo parecido a la trayectoria que usted vería que sigue una bala si disparara una pistola de juguete hacia arriba mientras viajara en un tiovivo). La característica sorprendente del análisis de Godel era su comprensión de que si su nave espacial siguiera trayectorias adecuadas en un universo giratorio, usted también podría volver a su lugar de origen en el espacio antes del instante de su partida. Un universo en rotación sería en sí mismo una máquina del tiempo.

Einstein felicitó a Gódel por su descubrimiento, pero sugirió que una investigación posterior podría demostrar que las soluciones a las ecuaciones de la relatividad general

que permiten el viaje al pasado no satisfacen otros requisitos físicos esenciales, haciéndolas no más que curiosidades matemáticas. Por lo que respecta a la solución de Gódel, las observaciones de gran precisión han minimizado la relevancia directa de su trabajo al establecer que nuestro universo no está girando. Pero Van Stockum y Gódel habían sacado al genio de la botella; en menos de dos décadas, se encontraron aún más soluciones de las ecuaciones de Einstein que permiten el viaje en el tiempo al pasado.

En décadas recientes se ha reavivado el interés por los diseños de hipotéticas máquinas del tiempo. En la década de 1970 Frank Tipler reanalizó y refinó la solución de Van Stockun, y en 1991 Richard Gott de la Universidad de Princeton descubrió otro método para construir una máquina del tiempo haciendo uso de las denominadas cuerdas cósmicas (remanentes filamentosos, hipotéticos, infinitamente largos de transiciones de fase en el universo primitivo). Todas éstas son contribuciones importantes, pero la propuesta más simple de describir, utilizando conceptos que hemos desarrollado en capítulos anteriores, fue descubierta por Kip Thome y sus estudiantes en el Instituto de Tecnología de California. Hace uso de agujeros de gusano.

Plano para una máquina del tiempo agujero de gusano

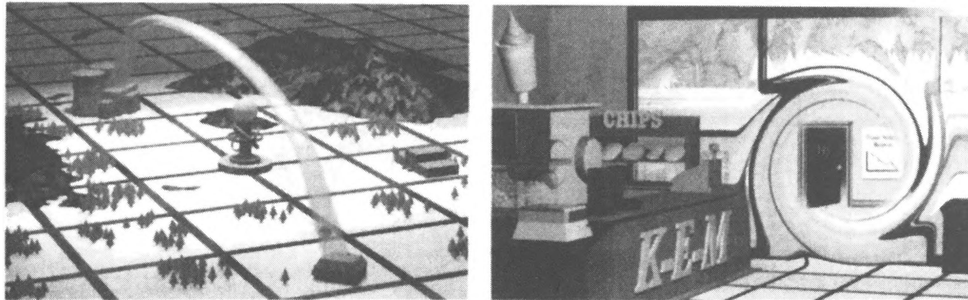
Expondré primero la estrategia básica para construir la máquina del tiempo agujero de gusano de Thome, y en la próxima sección discutiré los retos a los que se enfrentaría un contratista al que contratara Thome para ejecutar los planes.

Un *agujero de gusano* es un túnel hipotético a través del espacio. Un tipo de túnel más familiar, tal como uno que ha sido horadado en la falda de una montaña, ofrece un atajo para ir de un lugar a otro. Los agujeros de gusano sirven para un fin similar, pero difieren de los túneles convencionales en un aspecto importante. Mientras que los túne-

les convencionales proporcionan una nueva ruta a través del espacio existente —la montaña y el espacio que ocupa existe antes de que se construya un túnel— un agujero de gusano proporciona un túnel desde un punto del espacio a otro a lo largo de un tubo de espacio nuevo y no existente previamente. Si usted eliminara el túnel que atraviesa la montaña, el espacio que ocupaba seguiría existiendo. Si eliminara un agujero de gusano, el espacio que ocupaba desaparecería.

La figura 15.2a ilustra un agujero de gusano que conecta el Kwik- E-Mart y la Central Nuclear de Sprinfield, pero el dibujo es confuso porque el agujero de gusano parece extenderse por el espacio aéreo de Springfield. Para ser más exactos, el agujero de gusano debería considerarse como una nueva región de espacio que se conecta con el espacio familiar ordinario sólo en sus extremos: sus bocas. Si mientras camina por las calles de Springfield, usted examinara la línea del cielo en busca del agujero de gusano, no vería nada. La única manera de verlo sería saltar al Kwik-E-Mart, donde usted encontraría una abertura en el espacio ordinario: una boca del agujero de gusano. Mirando a través de la abertura usted vería el interior de la central, la localización de la segunda boca, como en la figura 15.2.b. Otra característica confusa de la figura 15.2a es que el agujero de gusano no parece ser un atajo. Podemos corregir

esto modificando la ilustración como en la figura 15.3. Como puede ver, la ruta usual desde la central al Kwik-E-



(a)(b) Figura 15.2. **(a)** Un agujero de gusano que va desde el Kwik-E-Mart a la central nuclear, **(b)** La vista a través del agujero de gusano, mirando desde la boca en el Kwik-E-Mart hacia la boca en la central nuclear.

Mart es de hecho más larga que el nuevo pasaje espacial del agujero de gusano. Las contorsiones de la figura 15.3 reflejan las dificultades para dibujar en una página la geometría de la relatividad general, pero la figura da una idea intuitiva de la nueva conexión que proporcionaría un agujero de gusano.

Nadie sabe si existen los agujeros de gusano, pero hace muchas décadas los físicos establecieron que están permitidos por las matemáticas de la relatividad general y son así aptos para el estudio teórico. En la década de 1950, John Wheeler y sus colaboradores estuvieron entre los primeros investigadores que investigaron los agujeros de gusano y descubrieron muchas de sus propiedades matemáticas fundamentales. Más recientemente, no obstante, Thorne y sus colaboradores revelaron toda la riqueza de los agujeros de gusano al darse cuenta de que no sólo pueden proporcionar atajos a través del espacio,

sino que también pueden proporcionar atajos a través del tiempo.

Ésta es la idea. Imagine que Bart y Lisa están en extremos opuestos del agujero de gusano de Springfield —Bart en la central y Lisa en el Kwik-E-Mart— hablando tranquilamente uno con otro de qué regalar a Homer para su cumpleaños, cuando Bart se decide a tomar un corto crucero transgaláctico (para traerle a Homer unos de sus palitos de pescado andromedeanos favoritos). A Lisa no le apetece el viaje pero como siempre quiso ver Andrómeda convence a Bart de que cargue su boca de agujero de gusano en su nave y se lo lleve de modo que

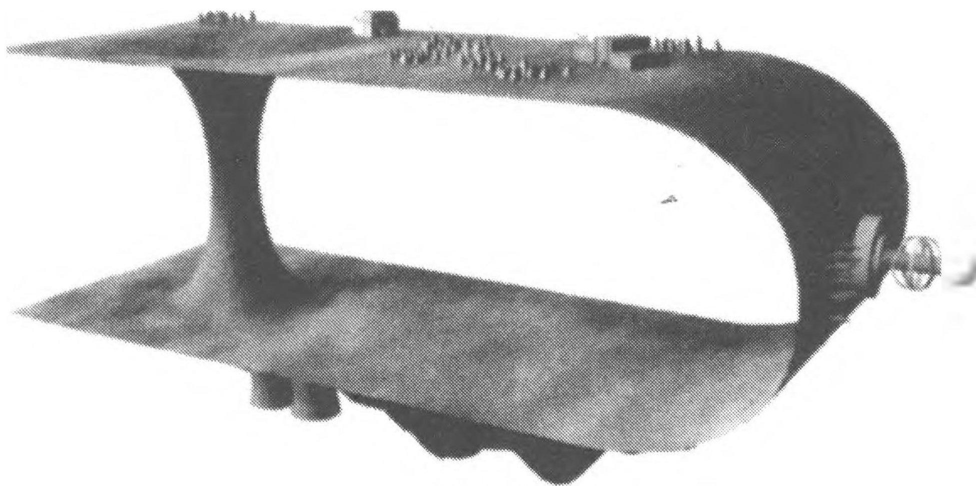


FIGURA 15.3. Geometría que muestra con más claridad que el agujero de gusano es un atajo. (Las bocas del agujero de gusano están realmente dentro del Kwik-E-Mart y de la central nuclear, aunque esto es difícil de mostrar en esta representación.)

ella pueda echar una mirada. Usted quizá espera que esto significa que Bart tendrá que seguir estirando el agujero de gusano a medida que avanza en su viaje, pero eso supone que el agujero de gusano conecta el Kwik-E-Mart y la nave de Bart a través del espacio ordinario. No es así. Y,

como se ilustra en la figura 15.4, gracias a las maravillas de la geometría de la relatividad general, la longitud del agujero de gusano puede permanecer fija a lo largo de todo el viaje. Este es un punto clave. Incluso si Bart sale disparado hacia Andrómeda, su distancia a Lisa a través del agujero de gusano no cambia. Esto hace manifiesto el papel del agujero de gusano como atajo a través del espacio.

Para ser precisos, digamos que Bart sale a una velocidad del 99,99999999999999999 por 100 de la velocidad de la luz y viaja cuatro horas hasta Andrómeda, mientras continúa hablando con Lisa a través del agujero de gusano, igual que estaban haciendo antes del vuelo. Cuando la nave llega a Andrómeda, Lisa le dice a Bart que se aparte de modo que ella pueda tener una visión sin ningún impedí-

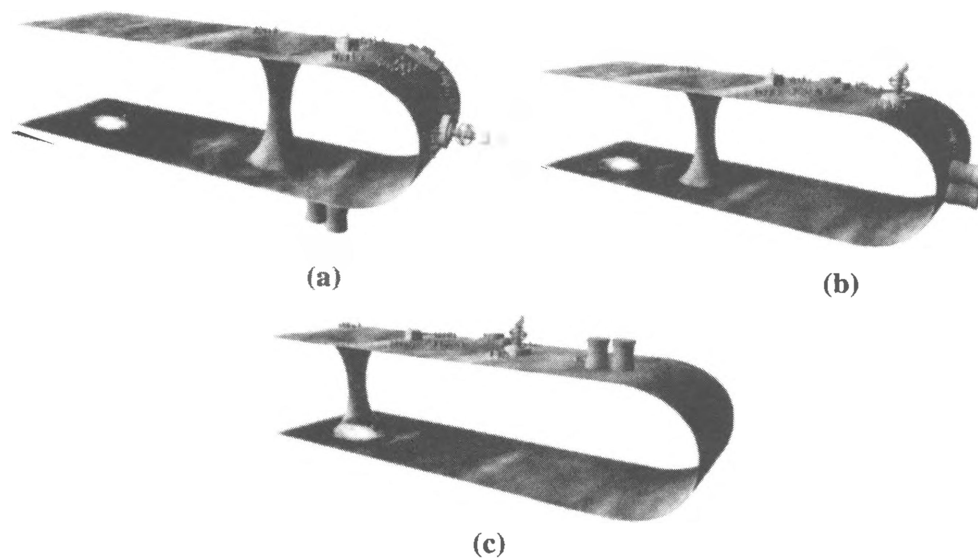


FIGURA 15.4. **(a)** Un agujero de gusano que conecta el Kwik-E-Mart y la central nuclear, **(b)** La abertura inferior del agujero de gusano transportada (desde la central nuclear) al espacio exterior (en la nave espacial, no mostrada). La longitud del agujero de gusano permanece fija, (c) La abertura del agujero de gusano llega a la galaxia Andrómeda; la otra abertura sigue estando en el Kwik-E- Mart. La longitud del agujero de gusano no varía a lo largo del viaje.

mentó. Ella está exasperada por la insistencia de él en recoger rápidamente un plato preparado en la tienda de alimentación y volver a Springfield, pero está de acuerdo en seguir hablando hasta que él regrese. Cuatro horas y unas pocas docenas de tictacs más tarde Bart posa su nave sin problemas en el césped de Springfield High.

Sin embargo, cuando mira por la ventana de la nave, Bart sufre una conmoción. Los edificios parecen completamente diferentes, y en el marcador que flota por encima del estadio figura una fecha de unos seis millones de años después de su partida. «¡Guay!», se dice a sí mismo, pero un momento más tarde todo se aclara. La relatividad especial, recuerda de una conversación íntima que tuvo recientemente con Sideshow Bob, asegura que cuanto más rápido viaja uno más lentos marchan sus relojes. Si usted viaja en el espacio a gran velocidad y luego regresa, podrían haber transcurrido sólo unas horas a bordo de su nave, aunque habrán transcurrido miles o millones de años, si no más, según alguien en reposo. Con un cálculo rápido, Bart confirma que a la velocidad a la que estaba viajando ocho horas transcurridas en la nave significarían 6.000 millones de años transcurridos en la Tierra. La fecha en el marcador es correcta; Bart se da cuenta de que ha viajado lejos al futuro de la Tierra.

«…¡Bart! Hola, ¡Bart!» grita Lisa a través del agujero de gusano. «¿Me has estado escuchando? Vamos. Quiero estar en casa a tiempo para cenar.» Bart mira dentro de la boca de su agujero de gusano y dice a Lisa que él ya ha aterrizado en el césped de Springfield High. Mirando con más atención a través del agujero de gusano Lisa ve que Bart está diciendo la verdad, pero mirando fuera del Kwik-E-Mart hacia Springfield High ella no ve la nave en el césped. «Yo no lo entiendo», dice.

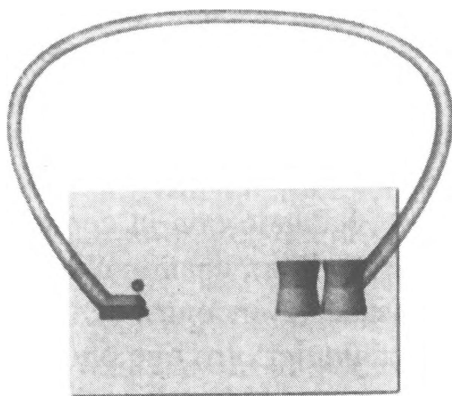
«En realidad, tiene perfecto sentido», responde Bart orgullosa- mente. «Yo he aterrizado en Springfield High, pero a seis millones de años en el futuro. Tú no puedes verme mirando por la ventana del Kwik-E-Mart porque estás mirando en el lugar correcto pero no estás mirando en el tiempo correcto. Estás mirando seis millones de años demasiado pronto.»

«Oh, bien, es esa dilatación de tiempo de la relatividad especial», acepta Lisa. «Tranquilo. En cualquier caso, yo quiero ir a casa a tiempo para cenar, de modo que ven por el agujero de gusano, porque tenemos que damos prisa.» «Muy bien», dice Bart, arrastrándose por el agujero de gusano. Compra una Butterfinger de Apu y él y Lisa se dirigen a casa.

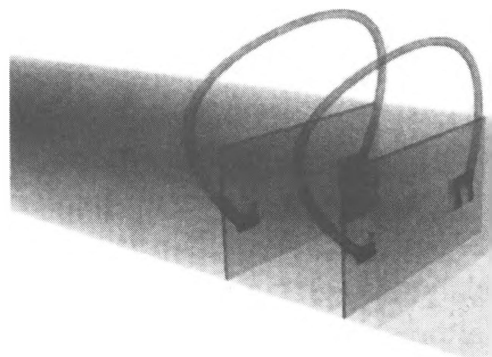
Note que aunque Bart sólo tardó un momento en atravesar el agujero de gusano, *le transportó seis millones de años atrás en el tiempo.* Él y su nave y la boca del agujero de gusano habían aterrizado en el futuro lejano de la Tierra. Si hubiera salido, hablado con la gente y visto el periódico, todo habría confirmado esto. Pero, cuando él atravesó el agujero de gusano y se reunió con Lisa, él se encontró de vuelta en el presente. Lo mismo es cierto para cualquier otro que pudiera seguir a Bart a través de la boca del agujero de gusano: también viajaría seis millones atrás en el tiempo. Análogamente, cualquiera que se introduzca en la boca del agujero de gusano en el Kwik-E-Mart y salga por la boca que Bart dejó en su nave viajaría seis millones de años al futuro. El punto importante es que Bart no se llevó simplemente una de las bocas del agujero de gusano en un viaje a través del espacio. Su viaje también transportó la boca del agujero de gusano a través del tiempo. *El viaje de Bart le llevó a él y ala boca del agujero de gusano al futuro de la Tierra. En resumen, Bart transformó un túnel a*

través del espacio en un túnel a través del tiempo; convirtió un agujero de gusano en una máquina del tiempo.

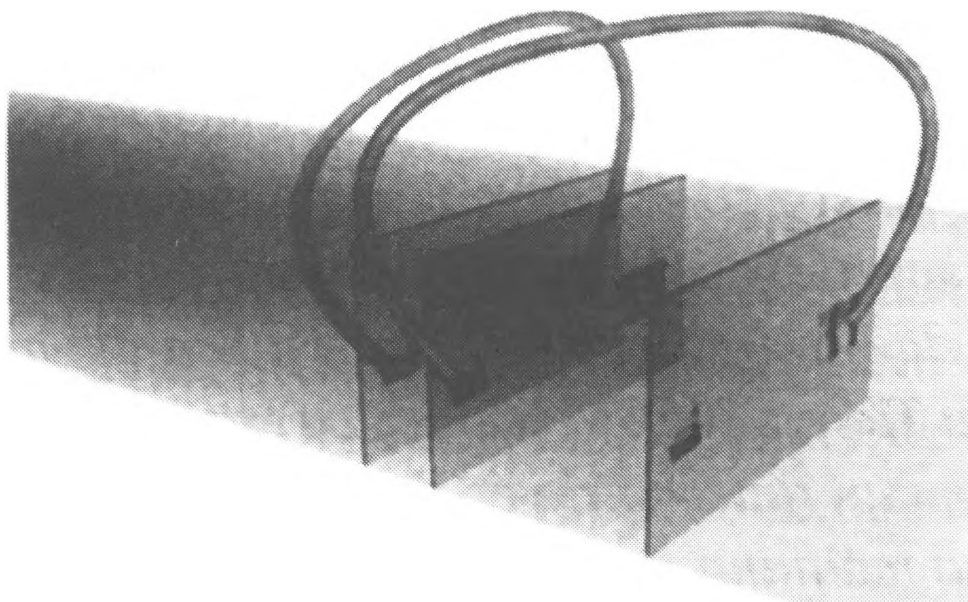
Una forma tosca de visualizar lo que está sucediendo se representa en la figura 15.5. En la figura 15.5a vemos un agujero de gusano que conecta una localización espacial con otra, con la configuración del agujero de gusano dibujada de modo que resalte que yace fuera del espacio ordinario. En la figura 15.5b mostramos la evolución temporal de este agu ;ro de gusano, suponiendo que sus dos bocas se mantienen en reposo. (Las rebanadas de tiempo son las de un observador en reposo.) En la figura 15.5c mostramos lo que sucede cuando una boca del agujero de gusano se carga en una nave espacial y se lleva en un viaje de ida-y-vuelta. El tiempo para la boca en movimiento, igual que el tiempo en un reloj en movimiento, se frena, de modo que la boca en movimiento se transporta al futuro. (Si transcurre una hora en un reloj en movimiento pero transcurren mil años en relojes en reposo, el reloj en movimiento habrá saltado al futuro de los relojes en reposo.) Así pues, en lugar de conectar la boca del agujero de gusano en reposo, vía el túnel del agujero de gusano, a una boca en la misma



(a)



(b)



(c)

FIGURA 15.5. (a) Un agujero de gusano, creado en cierto instante en el tiempo, conecta un lugar en el espacio con otro, (b) Si las bocas del agujero de gusano no se mueven una con respecto a otra, ellas «pasan» a través del tiempo al mismo ritmo, de modo que el túnel conecta las dos regiones en el mismo instante, **(c)** Si una boca del agujero de gusano se lleva en un viaje de ida y vuelta (no mostrado), menos tiempo transcurrirá para dicha boca, y por ello el túnel conectará las dos regiones del espacio en instantes diferentes de tiempo. El agujero de gusano se ha transformado en una máquina del tiempo.

rebanada temporal, lo conecta a una boca en una rebanada de tiempo *futuro,* como en la figura 15.5c. A menos que las bocas del agujero de gusano se lleven más lejos, la diferencia de tiempo entre ellas permanecerá bloqueada. En ese instante, si usted entrara por una boca y saliera por la otra se habría convertido en un viajero en el tiempo.

Construyendo una máquina del tiempo agujero de gusano

Ahora está claro cómo hacer un plano para construir una máquina del tiempo. Paso 1: encontrar o crear un agu,ero de gusano suficientemente ancho para que usted o lo que quiera enviar a través del tiempo, pueda pasar por él. Paso 2: establecer una diferencia de tiempo entre las bocas del agujero de gusano —por ejemplo, moviendo una con respecto a la otra—. Eso es. En teoría.

¿Qué pasa en la práctica? Bien, como mencioné de entrada, nadie sabe siquiera si los agujeros de gusano existen. Algunos físicos han sugerido que minúsculos agujeros de gusano podrían ser abundantes en la constitución microscópica del tejido del espacio, siendo producidos continuamente por fluctuaciones cuánticas del campo gravitatorio. Si es así, el reto consistiría en agrandar uno hasta un tamaño macroscópico. Se han hecho propuestas de cómo podría hacerse, pero apenas están más allá de vuelos teóricos de la fantasía. Otros físicos han concebido la creación de grandes agujeros de gusano como un proyecto de ingeniería en relatividad general aplicada. Sabemos que el espacio responde a la distribución de materia y energía, de modo que con suficiente control sobre materia y energía podríamos hacer que una región del espacio genere un agujero de gusano. Esta aproximación presenta una complicación adicional, porque de la misma forma que debemos horadar la falda de una montaña para poner la boca de un túnel, debemos horadar el tejido del espacio para poner la boca de un agujero de gusano.[15.12] Nadie sabe si estos desgarrones en el espacio están permitidos por las leyes de la física.

El trabajo en el que yo he estado involucrado en teoría de cuerdas (ver páginas 490-492) ha demostrado que

ciertos tipos de desgarrones espaciales son posibles, pero por ahora no tenemos ninguna idea de si estos desgarrones podrían ser relevantes para la creación de agujeros de gusano. La conclusión es que la adquisición intencionada de un agujero de gusano macroscópico es una fantasía que, en el mejor de los casos, está *muy* lejos de ser realizada.

Además, incluso si de algún modo nos las arregláramos para conseguir un agujero de gusano macroscópico, no habríamos terminado; aún tendríamos que enfrentamos a un par de obstáculos importantes. Primero, la década de 1960 Wheeler y Robert Fuller demostraron, utilizando las ecuaciones de la relatividad general, que los agujeros de gusano son inestables. Sus paredes tienden a colapsar hacia adentro en una fracción de segundo, lo que elimina su utilidad para cualquier tipo de viaje. Más recientemente, no obstante, los físicos (entre los que se incluyen Thome y Morris, y también Matt Visser) han encontrado una forma potencial de rodear el problema del colapso. Si el agujero de gusano no está vacío, sino que en su lugar contiene un material —denominado *materia exótica*— que puede ejercer un empuje hacia afuera en sus paredes, entonces sería posible mantener el agujero de gusano abierto y estable. Aunque similar en sus efectos a una constante cosmológica, la materia exótica generaría gravedad repulsiva que presiona hacia afuera en virtud de tener energía negativa (no sólo la presión negativa característica de una constante cosmológica).[15.13] En situaciones altamente especializadas, la mecánica cuántica permite energía negativa,[15.14] pero sería un desafío tremendo generar suficiente materia exótica para mantener abierto un agujero de gusano. (Por ejemplo, Visser ha calculado que la cantidad de energía negativa necesaria para mantener abierto un agujero de gusano de un metro de ancho es aproximadamente igual en magnitud a la energía total

producida por el Sol en más de 10.000 millones de años.) **[15.15]**

Segundo, incluso si de algún modo se encontrara o creara un agujero de gusano macroscópico, e incluso si de algún modo fuéramos capaces de apuntalar sus paredes contra el colapso inmediato, e incluso si fuéramos capaces de inducir una diferencia de tiempo entre las bocas del agujero de gusano (por ejemplo, lanzando una boca a alta velocidad), quedaría otro obstáculo para adquirir una máquina del tiempo. Varios físicos, incluyendo a Stephen Hawking, han planteado la posibilidad de que fluctuaciones de vacío —las agitaciones que surgen de la incertidumbre cuántica experimentada por todos los campos, incluso en el espacio vacío, discutidas en el capítulo 12— podrían destrozar un agujero de gusano precisamente cuando se encontraba en situación de ser una máquina del tiempo. La razón es que, justo en el momento en que se hace posible el viaje en el tiempo a través del agujero de gusano, un mecanismo de realimentación devastador, algo parecido al chirrido generado cuando los niveles del micrófono y el altavoz en un sistema de sonido no están ajustados adecuadamente, puede entrar en juego. Las fluctuaciones de vacío del futuro pueden viajar a través del agujero de gusano al pasado, y entonces pueden viajar a través del espacio y el tiempo ordinarios al futuro, entrar en el agujero de gusano y viajar de nuevo al pasado, creando un ciclo sin fin a través del agujero de gusano y llenándolo con energía cada vez mayor. Presumiblemente, una acumulación de energía tan intensa destruiría el agujero de gusano. La investigación teórica sugiere que esto es una posibilidad real, pero los cálculos necesarios fuerzan nuestra comprensión actual de la relatividad general y la mecánica cuántica en un espaciotiempo curvo, de modo que no hay prueba concluyente.

Los desafíos para construir una máquina del tiempo agujero de gusano son evidentemente inmensos. Pero la palabra final no se dará hasta que nuestra comprensión de la mecánica cuántica y la gravedad se refine más, quizá mediante avances en la teoría de supercuerdas. Aunque a un nivel intuitivo los físicos están de acuerdo en general en que el viaje en el tiempo al pasado es imposible, hoy por hoy la cuestión todavía no está completamente cerrada.

Turismo cósmico

Pensando en el viaje en el tiempo, Hawking ha planteado un punto interesante. Se pregunta por qué si el viaje en el tiempo es posible no hemos tenido una avalancha de visitantes del futuro. Bien, podría decir usted, quizá la hemos tenido. Y podría ir más lejos y decir que hemos puesto a tantos viajeros del tiempo en celdas que la mayoría de los demás no se atreven a identificarse. Por supuesto, Hawking lo dice medio en broma, como lo hago yo, pero plantea una cuestión seria. Si usted cree, como creo yo, que no hemos sido visitados desde el futuro, ¿es eso equivalente a creer que el viaje en el tiempo es imposible? Por supuesto, si la gente tuviera éxito en construir máquinas del tiempo en el futuro, algún historiador acabará obteniendo una beca para estudiar, de cerca y personalmente, la construcción de la primera bomba atómica, o el primer viaje a la Luna, o la primera incursión en la te- lerrealidad. Así, si creemos que nadie nos ha visitado desde el futuro, quizá estamos diciendo implícitamente que no creemos que esa máquina del tiempo se construya nunca.

En realidad, no obstante, ésta no es una conclusión necesaria. *Las máquinas del tiempo que se han propuesto*

hasta ahora no permiten viajar a un tiempo anterior a la construcción de la primera máquina del tiempo. En el caso de la máquina del tiempo agujero de gusano esto es fácil de ver examinando la figura 15.5. Aunque hay úna diferencia de tiempo entre las bocas de los agujeros de gusano, y aunque esa diferencia permite viajar hacia delante y hacia atrás en el tiempo, usted no puede alcanzar un tiempo anterior a que se estableciera la diferencia de tiempo. El propio agujero de gusano no existe en el extremo izquierdo de la barra del espaciotiempo. De modo que no hay ninguna manera de que usted pueda utilizarlo para ir allí. Así, si la primera máquina del tiempo se construye, digamos, dentro de 10.000 años, *ese* momento atraerá sin duda a muchos turistas viajeros del tiempo, pero todos los tiempos anteriores, como el nuestro, seguirán siendo inaccesibles.

Encuentro curioso y atractivo que nuestra comprensión actual de las leyes de la Naturaleza no sólo sugiere cómo evitar las aparentes paradojas del viaje en el tiempo sino que también presenta propuestas de cómo podría conseguirse realmente el viaje en el tiempo. No me malinterprete; yo mismo me cuento entre los físicos serios que sienten intuitivamente que un día descartaremos el viaje en el tiempo al pasado. Pero hasta que no haya una demostración definitiva, creo que está justificado y es apropiado mantener una mente abierta. Como mínimo, los investigadores que se centran en estas cuestiones están profundizando sustancialmente nuestra comprensión del espacio y el tiempo en circunstancias extremas. En el mejor de los casos, pueden estar dando los primeros pasos críticos para integramos en la superautopis- ta del espaciotiempo. Después de todo, cada momento que pasa sin que tengamos éxito en construir una máquina del tiempo es un momento que estará para siempre más allá de nuestro alcance y el alcance de todos los que nos siguen.

16

El porvenir de una alusión

Perspectivas sobre el espacio y el tiempo

Los físicos pasan buena parte de su vida en un estado de confusión.

Es una ocupación de riesgo. Sobresalir en física es abrazar la duda mientras se recorre el sinuoso camino hacia la claridad. La incómoda sensación de perplejidad es lo que inspira a hombres y mujeres por lo demás corrientes para realizar extraordinarias hazañas de ingenio y creatividad; nada centra tanto la mente como los detalles disonantes que esperan una resolución armoniosa. Pero en camino a una explicación —en su búsqueda de nuevos marcos para abordar cuestiones sobresalientes— los teóricos deben andar con cuidado por la jungla de perplejidad, guiados básicamente por corazonadas, ideas, indicios y cálculos. Y puesto que la mayoría de los investigadores tienen tendencia a borrar sus huellas, los descubrimientos suelen dejar poca evidencia del arduo terreno que se ha cubierto. Pero no perdamos de vista el hecho de que nada viene fácilmente. La Naturaleza no cede sus secretos a la ligera.

En este libro hemos considerado numerosos capítulos de la historia de los intentos de nuestra especie por entender el espacio y el tiempo. Y aunque hemos encontrado algunas ideas profundas y sorprendentes, aún tenemos que llegar al último momento eureka en el que toda confusión

desaparece y se impone una claridad total. Aún estamos básicamente caminando en la jungla. Así que ¿de dónde venimos? ¿Cuál es el próximo capítulo en la historia del espaciotiempo? Por supuesto, nadie lo sabe con seguridad. Pero en años recientes han salido a la luz varias claves, y aunque aún tienen que ser integradas en una imagen coherente, muchos físicos creen que están llegando a la próxima gran convulsión en nuestra comprensión del cosmos. Con el tiempo, el espacio y el tiempo como actualmente se conciben pueden ser reconocidos como meras alusiones a unos principios más sutiles, más profundos y más fundamentales que subyacen a la realidad física. En el capítulo final de esta exposición vamos a considerar algunas de estas claves y alcanzaremos a ver dónde puede llevamos nuestra búsqueda continua por captar el tejido del cosmos.

¿Son espacio y tiempo conceptos fundamentales?

El filósofo alemán Immanuel Kant sugirió que prescindir del espacio y el tiempo cuando pensamos en el universo no sería simplemente difícil, sería completamente imposible. Con franqueza, puedo ver de dónde venía Kant. Cada vez que me siento, cierro los ojos y trato de pensar en cosas sin representarlas de algún modo ocupando espacio o experimentando el paso del tiempo, me quedo corto. Muy corto. El espacio, a través del contexto, o el tiempo, a través del cambio, siempre se las arreglan para aparecer. Irónicamente, lo más cerca que llego a limpiar mis ideas de una asociación espaciotemporal directa es cuando estoy absorto en un cálculo matemático (que a menudo tiene que ver con el espaciotiempo), porque la naturaleza del ejercicio parece capaz de engullir mis pensamientos, aunque sólo

sea momentáneamente, en un escenario abstracto que parece privado de espacio y tiempo. Pero las ideas mismas y el cuerpo en el que tienen lugar son, en cualquier caso, parte del espacio y el tiempo familiares. Eludir verdaderamente el espacio y el tiempo es más difícil que escapar de la propia sombra.

No obstante, muchos de los físicos destacados de hoy sospechan que espacio y tiempo, aunque persistentes, quizá no sean verdaderamente fundamentales. De la misma forma que la dureza de una bala de cañón emerge de las propiedades colectivas de sus átomos, y de la misma forma que el olor de una rosa emerge de las propiedades colectivas de sus moléculas, y de la misma forma que la rapidez de un guepardo emerge de las propiedades colectivas de sus músculos, nervios y huesos, así también las propiedades del espacio y el tiempo —nuestra preocupación en gran parte de este libro— quizá emerjan del comportamiento colectivo de algunos otros constituyentes más fundamentales que aún tenemos que identificar.

Los físicos resumen a veces esta posibilidad diciendo que el espaciotiempo puede ser una ilusión —una burla provocadora, pero cuyo significado requiere una interpretación adecuada—. Después de todo, si usted fuese golpeado por una bala de cañón, o inhalara la atractiva fragancia de una rosa, o viera a un rápido guepardo, no negaría su existencia simplemente porque cada uno de ellos está compuesto de entidades más básicas. Por el contrario, pienso que la mayoría de nosotros estaríamos de acuerdo en que estas agrupaciones de materia existen, y además, que hay mucho que aprender estudiando cómo emergen sus características familiares de sus constituyentes atómicos. Pero puesto que son compuestos, lo que no trataríamos de hacer es construir una teoría del universo

basada en balas de cañón, rosas y guepardos. Del mismo modo, si espacio y tiempo resultan ser entidades compuestas, eso no significaría que sus manifestaciones familiares, desde el cubo de Newton a la gravedad de Einstein sean ilusorias; hay poca duda de que espacio y tiempo retendrán sus posiciones globales en la realidad de la experiencia, independientemente de los desarrollos futuros en nuestra comprensión. Más bien, el espaciotiempo compuesto significaría que todavía está por descubrir una descripción aún más elemental del universo, una que sea aespacial y atemporal. La ilusión, entonces, sería de nuestra propia cosecha: la errónea creencia de que la comprensión más profunda del cosmos pondría al espacio y el tiempo ante el foco más nítido posible. De la misma manera que la dureza de una bala de cañón, y el olor de la rosa, y la velocidad del guepardo desaparecen cuando usted examina la materia en el nivel atómico y subatómico, también el espacio y el tiempo pueden disolverse cuando se examinan con la formulación más fundamental de las leyes de la Naturaleza.

Que el espaciotiempo no esté entre los ingredientes cósmicos fundamentales puede parecerle algo extravagante. Y muy bien podría tener razón. Pero los rumores de la salida inmediata del espa- ciotiempo de la ley física profunda no nacen de la pura teorización. Por el contrario, esta idea está sugerida con fuerza por varias consideraciones bien argumentadas. Echemos una mirada a algunas de las más destacadas.

Promedio cuántico

En el capítulo 12 discutimos cómo el tejido del espaciotiempo, como todo lo demás en nuestro universo

cuántico, está sometido a las agitaciones de la incertidumbre cuántica. Son estas fluctuaciones, recordará usted, las que se llevaban por delante a las teorías de partículas puntuales, impidiéndoles proporcionar una teoría razonable de la gravedad. Reemplazando las partículas puntuales por lazos y trozos, la teoría de cuerdas diluye las fluctuaciones —reduciendo sustancialmente su magnitud— y así es como da una unificación satisfactoria de la mecánica cuántica y la relatividad general. De todas formas, las fluctuaciones reducidas del espaciotiempo siguen existiendo (como se ilustra en el penúltimo nivel de ampliación de la figura 12.2), y dentro de ellas podemos encontrar claves importantes para el destino del espaciotiempo.

En primer lugar, aprendemos que el espacio y el tiempo familiares que llenan nuestros pensamientos y soportan nuestras ecuaciones emergen de una especie de proceso de promediado. Piense en la imagen pixelada que usted ve cuando se acerca a pocos centímetros de una pantalla de televisor. Esta imagen es muy diferente de la que ve cuando está a una distancia más cómoda, porque una vez que usted ya no puede resolver píxeles individuales, sus ojos los combinan en un promedio que parece suave. Pero note que es sólo gracias al proceso de promediado por lo que los píxeles producen una imagen familiar continua. De modo análogo, la estructura microscópica del espacio- tiempo está rizada con ondulaciones cuánticas, pero no somos directamente conscientes de ellas porque carecemos de la capacidad para resolver el espaciotiempo en escalas tan minúsculas. En su lugar, nuestros ojos, e incluso nuestros aparatos más potentes, combinan las ondulaciones en un promedio, de forma muy parecida a lo que sucede con los píxeles. Puesto que las ondulaciones son aleatorias, en una región pequeña hay normalmente tantas ondulaciones

«arriba» como «abajo», de modo que cuando se promedian tienden a cancelarse, dando un espaciotiempo plácido. Pero, como en la analogía del televisor, *la forma suave y tranquila del espaciotiempo emerge solamente debido al proceso de promediado.*

El promediado cuántico ofrece una interpretación más práctica de la afirmación de que el espaciotiempo familiar puede ser ilusorio. Los promedios son útiles para muchos fines, pero, por diseño, no proporcionan una imagen clara de los procesos subyacentes. Aunque la familia media en Estados Unidos tiene 2,2 hijos, yo le pondría en un compromiso si le pidiera que me presentara a una familia así. Y aunque el precio medio de un galón de leche es 2,783 dólares, es poco probable que usted encuentre una tienda que lo venda exactamente a ese precio. Así también, quizá el espaciotiempo familiar, resultado él mismo de un proceso de promediado, no describa los detalles de algo a lo que nos hubiera gustado llamar fundamental. Quizá el espacio y el tiempo sean sólo concepciones aproximadas y colectivas, extraordinariamente útiles al analizar el universo a todas las escalas salvo las ultramicroscópicas, pero tan ilusorio como una familia de 2,2 hijos.

Una segunda idea, relacionada con la anterior, es que las agitaciones cuánticas cada vez más intensas que aparecen en escalas cada vez menores sugieren que la idea de poder dividir distancias o duraciones en unidades cada vez más pequeñas llega probablemente a un final a aproximadamente la longitud de Planck (10“^{33} centímetros) y el tiempo de Planck (10“^{43} segundos). Encontramos esta idea en el capítulo 12, donde subrayamos que, aunque la noción está en conflicto total con nuestras habituales experiencias del espacio y el tiempo, no es particularmente sorprendente que una propiedad relevante para lo cotidiano no sobreviva cuando se lleva al microrreino. Y puesto que la

divisibilidad arbitraria del espacio y el tiempo es una de sus propiedades cotidianas más familiares, la inaplicabilidad de este concepto a escalas ultrapequeñas da otro indicio de que hay algo más escondido en las microprofundidades —algo que podría llamarse el substrato básico del espaciotiempo— la entidad a la que alude la noción familiar de espaciotiempo. Esperamos que este ur-ingrediente, la materia espa- ciotemporal más elemental, no admita disección en piezas cada vez más pequeñas debido a las violentas fluctuaciones que aparecerían en última instancia, y así es completamente diferente al espaciotiempo a gran escala que experimentamos directamente. Parece probable, por consiguiente, que la apariencia de los constituyentes fundamentales del espaciotiempo —cualesquiera que puedan ser— es alterada significativamente por el proceso de promediado por el que dan el espacio- tiempo de la experiencia común.

Así, buscar el espaciotiempo familiar en las leyes más profundas de la Naturaleza quizá sea como tratar de tocar la Novena Sinfonía de Beethoven solamente nota a nota o pintar uno de los cuadros de heno de Monet solamente pincelada a pincelada. Al igual que estas obras maestras de la expresión humana, el espaciotiempo entero de la Naturaleza puede ser tan diferente de sus partes que nada que se le parezca existe en el nivel más fundamental.

Geometría en traducción

Otra consideración, una que los físicos llaman dualidad geométrica, también sugiere que quizá el espaciotiempo no sea fundamental, pero lo sugiere a partir de un punto de vista muy diferente. Su descripción es un poco más técnica que el promediado cuántico, de modo que siéntase libre

para saltársela si esta sección se hace en algún momento demasiado pesada. Pero puesto que muchos investigadores consideran que este material está entre las características más emblemáticas de la teoría de cuerdas, vale la pena tratar de entender la esencia de las ideas.

En el capítulo 13 vimos cómo las cinco teorías de cuerdas supuestamente distintas son en realidad diferentes traducciones de una y la misma teoría. Entre otras cosas, hicimos hincapié en que ésta es una poderosa idea porque, cuando se traduce, cuestiones extraordinariamente difíciles se hacen a veces mucho más fáciles de responder. Pero hay una característica del diccionario de la traducción que unifica las cinco teorías que no he mencionado hasta ahora. De la misma forma que el grado de dificultad de una pregunta puede cambiar radicalmente por la traducción de una formulación de cuerdas a otra, así también puede hacerlo la descripción de la forma geométrica del espaciotiempo. Esto es lo que quiero decir.

Puesto que la teoría de cuerdas requiere más de las tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal de la experiencia común, nos vimos motivados en los capítulos 12 y 13 a asumir la cuestión de dónde podrían estar ocultas las dimensiones extras. La respuesta que encontramos es que pueden estar enrolladas en un tamaño que, hasta ahora, ha eludido la detección porque es más pequeño que lo que podemos sondear experimentalmente. También encontramos que la física en nuestras dimensiones grandes familiares es dependiente del tamaño y la forma precisos de las dimensiones extras porque sus propiedades geométricas afectan a las pautas geométricas que pueden ejecutar las cuerdas. Bueno. Ahora la parte que dejé fuera.

El diccionario que traduce las preguntas planteadas en una teoría de cuerdas en preguntas diferentes planteadas en otra teoría de cuerdas *también traduce la geometría de*

las dimensiones extras en la primera teoría en una geometría extradimensional diferente en la segunda teoría. Si, por ejemplo, usted está estudiando las consecuencias físicas de, digamos, la teoría de cuerdas Tipo IIA con dimensiones extra enrolladas en una forma y tamaño particular, entonces cada conclusión a la que usted pueda llegar puede deducirse, al menos en teoría, considerando preguntas traducidas adecuadamente a, digamos, la teoría de cuerdas Tipo IIB. Pero el diccionario para llevar a cabo la traducción exige que las dimensiones extras en la teoría de cuerdas Tipo IIB estén enrolladas en una forma geométrica precisa que depende de *—aunque generalmente difiere de* — la forma dada por la teoría Tipo IIA. En resumen, una teoría de cuerdas dada con dimensiones enrolladas en una forma geométrica es equivalente a —es una traducción de— otra teoría de cuerdas con dimensiones enrolladas en una forma geométrica *diferente.*

Y las diferencias en la geometría espaciotemporal no tienen por qué ser menores. Por ejemplo, si una de las dimensiones extras de, digamos, la teoría de cuerdas Tipo IIA debería estar enrollada en un círculo, como en la figura 12.7, el diccionario de traducción muestra que esto es absolutamente equivalente a la teoría de cuerdas Tipo IIB con una de sus dimensiones extras también enrollada en un círculo, pero una cuyo radio es inversamente proporcional al original. Si un círculo es minúsculo, el otro es grande, y viceversa —y pese a todo no hay ninguna manera de distinguir entre las dos geometrías—. (Expresando las longitudes como múltiplos de la longitud de Planck, si un círculo tiene radio *R,* el diccionario matemático muestra que el otro círculo tiene radio 1/7?.) Usted pensaría que podría distinguir fácil e inmediatamente entre una dimensión grande y una pequeña, pero en la teoría de cuerdas no siempre es así. Todas las observaciones derivan de las

interacciones entre cuerdas, y estas dos teorías, la Tipo IIA con una gran dimensión circular y la Tipo IIB con una dimensión circular pequeña, son meramente traducciones diferentes —formas diferentes de expresión— de la misma física. Cada observación que usted describe dentro de una teoría de cuerdas tiene una descripción alternativa e igualmente viable dentro de la otra teoría de cuerdas, incluso si el lenguaje de cada teoría y la interpretación que da pueden diferir. (Esto es posible porque hay dos configuraciones cualitativamente diferentes para el movimiento de cuerdas en una dimensión circular: aquellas en las que la cuerda está enrollada alrededor del círculo como una goma elástica alrededor de una lata, y aquellas en las que la cuerda reside en una porción del círculo pero no se enrolla a su alrededor. Las primeras tienen energías que son *proporcionales* al radio del círculo (cuanto mayor es el radio, más estiradas están las cuerdas enrolladas, de modo que más energía incorporan), mientras que la última tiene energías que son *inversamente proporcionales* al radio (cuanto menor es el radio, más dobladas están las cuerdas, de modo que más energéticamente se mueven debido a la incertidumbre cuántica). Nótese que si reemplazáramos el círculo original por uno de radio inverso, aunque intercambiando también cuerdas «enrolladas» y «no enrolladas» las energías físicas —y, tal como resulta, la física con más generalidad— quedarían inalteradas. Esto es exactamente lo que requiere el diccionario que traduce desde la teoría Tipo IIA a la teoría Tipo IIB, y es la razón por la que dos geometrías aparentemente diferentes —una dimensión circular grande y una pequeña— pueden ser equivalentes.

Una idea similar es válida también cuando las dimensiones circulares son reemplazadas por las formas de Calabi-Yau más complicadas introducidas en el capítulo 12.

Una teoría de cuerdas dada con dimensiones extras enrolladas en una forma de Calabi-Yau particular es traducida por el diccionario en una teoría de cuerdas diferente con dimensiones extras enrolladas en una forma de Calabi-Yau diferente (una forma que se denomina *espejo* o *dual* de la original). En estos casos, no sólo pueden diferir los tamaños de las Calabi-Yaus, sino que también pueden hacerlo sus formas, incluyendo el número y variedad de sus agujeros. Pero el diccionario de traducción asegura que difieren precisamente de la forma correcta, de modo que incluso si las dimensiones extras tienen formas y tamaños diferentes, la física que se sigue de cada teoría es absolutamente idéntica. (Hay dos tipos de agujeros en una forma de Calabi-Yau dada, pero sucede que las pautas vibracionales de cuerdas —y con ello las consecuencias físicas— son sensibles sólo a la diferencia entre el número de agujeros de cada tipo. De modo que si una Calabi-Yau tiene, digamos, dos agujeros del primer tipo y cinco del segundo, mientras que otra Calabi-Yau tiene cinco agujeros del primer tipo y dos del segundo, entonces incluso si difieren como formas geométricas pueden dar lugar a físicas idénticas. **[*48]**)

Desde otra perspectiva, esto despierta también la sospecha de que el espacio no es un concepto fundacional. Alguien que describa el universo utilizando una de las cinco teorías de cuerdas afirmaría que el espacio, incluyendo las dimensiones extras, tiene un tamaño y una forma concretos, mientras que algún otro que utilice una de las otras teorías de cuerdas afirmaría que el espacio, incluyendo las dimensiones extras, tiene una forma y un tamaño diferentes. Puesto que ambos observadores estarían utilizando simplemente descripciones matemáticas alternativas del mismo universo físico, no se trata de que uno estuviera en lo cierto y el otro estuviera equivocado.

Ambos podrían tener razón, incluso si sus conclusiones sobre el espacio —su tamaño y forma— difiriesen. Note también que no se trata de que estuvieran rebanando el espaciotiempo de maneras diferentes e igualmente válidas, como en la relatividad especial. Estos dos observadores no estarían de acuerdo en la estructura global del propio espaciotiempo. Y éste es el punto importante. La mayoría de los físicos espera que si el espacio- tiempo fuera realmente fundamental, todos, independientemente de la perspectiva —independientemente del lenguaje o teoría utilizados— estarían de acuerdo en sus propiedades geométricas. Pero el hecho de que, al menos dentro de la teoría de cuerdas, no tiene por qué ser necesariamente así, sugiere que el espaciotiempo puede ser un fenómeno secundario.

Así que nos vemos llevados a preguntar: si las ideas descritas en las dos últimas secciones nos llevan en la dirección correcta, y el espaciotiempo familiar no es sino una manifestación a gran escala de una entidad más fundamental, ¿cuál es esa entidad y cuáles son propiedades esenciales? Hoy por hoy nadie lo sabe. Pero en busca de respuestas, los investigadores han encontrado todavía más claves, y las más importantes han venido de la reflexión sobre los agujeros negros.

¿De dónde viene la entropía de los agujeros negros?

Los agujeros negros tienen la cara de póquer más inescrutable del universo. Desde el exterior parecen lo más simple que usted pueda ver. Las tres características que distinguen a un agujero negro son su masa (que determina lo grande que es: la distancia desde su centro a su horizonte de sucesos, la envolvente superficie de no

retomo), su carga eléctrica y la rapidez con que está girando. Ya está. No hay más detalles que aprender al examinar el rostro que un agujero negro presenta al cosmos. Los físicos resumen esto con el dicho «los agujeros negros no tienen pelo», lo que quiere decir que carecen del tipo de características detalladas que permiten una individualidad. Cuando usted ha visto un agujero negro con una masa, carga y rotación dadas (aunque haya deducido estas propiedades indirectamente, a través de su efecto sobre el gas y las estrellas circundantes, puesto que los agujeros negros son negros), decididamente los ha visto todos.

Sin embargo, tras su semblante pétreo los agujeros negros albergan las mayores reservas de desorden que el universo haya conocido. Entre todos los sistemas físicos de un tamaño dado con *cualquier* composición posible, los agujeros negros contienen la máxima entropía posible. Recordemos del capítulo 6 que una manera aproximada de pensar en esto procede directamente de la definición de entropía como una medida del número de reordenamientos de los constituyentes internos de un sistema que no tienen ningún efecto sobre su apariencia. Cuando se trata de agujeros negros, incluso si no podemos decir cuáles son realmente sus constituyentes —puesto que no sabemos qué sucede cuando la materia se aplasta en el centro del agujero negro— podemos decir con seguridad que reordenar estos constituyentes afecta tanto a la masa, carga o rotación de un agujero negro como reordenar las páginas de *Guerra y paz* afecta al peso del libro. Y puesto que masa, carga y rotación determinan por completo la cara que muestra un agujero negro al mundo externo, todas esas manifestaciones pasan inadvertidas y podemos decir que un agujero negro tiene máxima entropía.

Incluso así, usted podría sugerir un aumento de la entropía de un agujero negro de la siguiente forma simple. Usted construye una esfera hueca del mismo tamaño que un agujero negro dado, la llena de gas (hidrógeno, helio, dióxido de carbono, lo que sea) y deja que éste se difunda en su interior. Cuanto más gas bombea usted dentro, mayor es la entropía, puesto que más constituyentes significan más reordenamientos posibles. Usted podría conjeturar, entonces, que si sigue bombeando y bombeando, la entropía del gas aumentará continuamente y, con el tiempo, superará a la del agujero negro dado. Es una estrategia astuta, pero la relatividad general muestra que falla. Cuando más gas se bombea dentro, más masivos se hacen los contenidos de la esfera. Y antes de que usted llegue a la entropía de un agujero negro del mismo tamaño, la masa cada vez mayor dentro de la esfera alcanzará un valor crítico que hace que la esfera y sus contenidos *se conviertan en un agujero negro.* No hay modo de evitarlo. Los agujeros negros tienen un monopolio sobre el desorden máximo.

¿Qué pasa si usted trata de aumentar aún más la entropía en el espacio interior del propio agujero negro bombeando todavía más gas? La entropía seguirá aumentando, pero usted habrá cambiado las reglas del juego. Conforme la materia se sumerge en el voraz horizonte de sucesos de un agujero negro, no sólo aumenta la entropía del agujero negro sino que también lo hace su tamaño. El tamaño de un agujero negro es proporcional a su masa, de modo que a medida que vierte más materia en el agujero, éste se hace más grande y más pesado. Así, una vez que usted maximiza la entropía en una región del espacio al crear un agujero negro, cualquier intento de aumentar más la entropía en dicha región fracasará. Sencillamente la región no puede soportar más desorden.

Está saturada de entropía. Cualquier cosa que haga usted, ya sea bombear gas o arrojar un todoterreno, necesariamente haría que el agujero negro crezca y con ello ocupe una región espacial más grande. Así, la cantidad de entropía contenida dentro de un agujero negro no sólo nos dice una característica fundamental del agujero negro, sino que también nos dice algo fundamental acerca del propio espacio: *la entropía máxima que puede ser embutida dentro de una región del espacio —cualquier región del espacio, en cualquier lugar, en cualquier tiempo— es igual a la entropía contenida dentro de un agujero negro cuyo tamaño iguala al de la región en cuestión.*

Así pues, ¿cuánta entropía contiene un agujero negro de un tamaño dado? Aquí es donde las cosas se hacen interesantes. Razonando intuitivamente, empecemos con algo más fácilmente visualizable como el aire en un recipiente Tupperware. Si usted uniera dos recipientes semejantes, duplicando el volumen total y el número de moléculas de aire, podría conjeturar que había duplicado la entropía. Los cálculos detallados[16.1] confirman esta conclusión y muestran que, si todo lo demás (temperatura, densidad y demás variables) es igual, las entropías de los sistemas físicos familiares son proporcionales a sus volúmenes. Una siguiente conjetura natural es que la misma conclusión se aplicaría a cosas menos familiares, como agujeros negros, lo que nos lleva a esperar que la entropía de un agujero negro sea también proporcional a su volumen.

Pero en la década de 1970 Jakob Bekenstein y Stephen Hawking descubrieron que esto no es correcto. Sus análisis matemáticos demostraron que la entropía de un agujero negro no es proporcional a su volumen, sino que, en su lugar, es proporcional al *área* de su horizonte de sucesos —aproximadamente hablando, al área de su superficie—. Ésta

es una respuesta muy diferente. Si usted duplica el radio de un agujero negro su volumen aumentará en un factor 8 (2^3), aunque el área de su superficie sólo aumentará en un factor 4 (2^2); si usted aumentara su radio en un factor 100, su volumen aumentaría en un factor de 1 millón (100^3), aunque el área de su superficie aumentaría sólo en un factor de 10.000 (100^2). Los agujeros negros tienen mucho más volumen que área de superficie.**[16.2]** Así, incluso si los agujeros negros contienen la máxima entropía entre todos los objetos de un tamaño dado, Bekenstein y Hawking demostraron que la cantidad de entropía que contienen es menor que lo que hubiéramos conjeturado ingenuamente.

Que la entropía sea proporcional al área de la superficie no es simplemente una diferencia curiosa entre los agujeros negros y el Tupperware, de la que podemos tomar nota y seguir adelante. Hemos visto que los agujeros negros fijan un límite a la cantidad de entropía que, incluso en principio, puede ser embutida en una región del espacio: tome un agujero negro cuyo tamaño sea exactamente igual que el de la región en cuestión, calcule cuánta entropía tiene el agujero negro y ése es el límite absoluto a la cantidad de entropía que la región del espacio puede contener. Puesto que esta entropía, como demostraron los trabajos de Bekenstein y Hawking es proporcional al área de la superficie del agujero negro —que es igual al área de la superficie de la región, puesto que los escogimos del mismo tamaño— concluimos que la máxima entropía que puede contener cualquier región del espacio dada es proporcional al área de la superficie de dicha región.**[16.3]**

La discrepancia entre esta conclusión y la encontrada al considerar el aire atrapado en un Tupperware (donde encontramos que la cantidad de entropía era proporcional al *volumen* del Tupperware, y no a su superficie) es fácil de señalar. Puesto que suponíamos que el aire estaba

uniformemente disperso, el razonamiento del Tupperware ignoraba la gravedad: recuerde, cuando la gravedad cuenta, las cosas se aglomeran. Ignorar la gravedad está bien cuando las densidades son bajas, pero cuando usted está considerando una gran entropía, las densidades son altas, la gravedad cuenta y el razonamiento del Tupperware ya no es válido. En su lugar, tales condiciones extremas requieren los cálculos basados en la gravedad de Bekenstein y Hawking, con la conclusión de que la máxima entropía potencial para una región del espacio es proporcional al área de su superficie, y no a su volumen.

Todo muy bien, pero ¿por qué deberíamos preocupamos? Hay dos razones.

Primero, la entropía acotada da aún otra clave de que el espacio ultramicroscópico tiene una estructura atomizada. En detalle, Bekens- tein y Hawking encontraron que si usted imagina que dibuja un patrón de tablero de ajedrez en el horizonte de sucesos de un agujero negro, siendo cada casilla de una longitud de Planck por una longitud de Planck (de modo que cada uno de estos «cuadrados de Planck» tiene un área de aproximadamente 10^{66} centímetros cuadrados), entonces la entropía del agujero negro iguala al número de tales casillas que caben en su superficie.[16.4] Es difícil pasar por alto la conclusión a la que apunta con fuerza este resultado: cada cuadrado de Planck es una unidad fundamental y mínima de espacio, y cada una lleva una única unidad mínima de entropía. Esto sugiere que no hay nada, ni siquiera en principio, que pueda tener lugar dentro de un cuadrado de Planck, porque una actividad semejante podría aportar desorden y con ello el cuadrado de Planck podría contener más que la unidad de entropía encontrada por Bekenstein y Hawking. Una vez más, desde una perspectiva completamente diferente nos vemos llevados a la noción de una entidad espacial elemental.[16.5]

En segundo lugar, para un físico, el límite superior para la entropía que puede existir en una región de espacio es una cantidad crítica, casi sagrada. Para entender por qué, imagine que está trabajando para un psiquiatra conductista y su tarea consiste en mantener un registro detallado, momento a momento, de las interacciones entre grupos de niños intensamente hiperactivos. Cada mañana usted reza para que el grupo de ese día se porte bien, porque cuanto más desorden crean los niños, más difícil es su tarea. La razón es intuitivamente obvia, pero vale la pena decirla explícitamente: cuanto más desordenados son los niños, de más cosas tiene usted que seguir la pista. El universo presenta a un físico un desafío muy parecido. Una teoría física fundamental pretende describir todo lo que pasa —o podría pasar, siquiera en teoría— en una región de espacio dada. Y, como sucede con los niños, cuanto más desorden contiene la región —siquiera en teoría— más cosas debe ser capaz de seguir la teoría. Así pues, la máxima entropía que puede contener una región ofrece una test simple pero incisivo: los físicos esperan que una teoría verdaderamente fundamental sea una que encaje perfectamente con la entropía máxima en una región espacial dada. La teoría debería estar tan estrechamente sintonizada con la Naturaleza que su capacidad máxima para seguir la pista del desorden iguale exactamente al desorden máximo que una región puede contener, ni más ni menos.

El punto importante es que, si la conclusión del Tupperware hubiera tenido una validez ilimitada, una teoría fundamental habría necesitado la capacidad de dar cuenta del valor del volumen de desorden en una región dada. Pero puesto que el razonamiento falla cuando se incluye la gravedad —y puesto que una teoría fundamental debe incluir la gravedad— aprendemos que una teoría fundamental sólo necesita ser capaz de explicar el valor de

desorden del área de la superficie en cualquier región. Y como mostramos con un par de ejemplos numéricos hace unos pocos párrafos, para regiones grandes el último es mucho más pequeño que el primero.

Así pues, el resultado de Bekenstein y Hawking nos dice que una teoría que incluya la gravedad es, en cierto sentido, más sencilla que una teoría que no lo hace. Hay menos «grados de libertad» —menos cosas que pueden cambiar y así contribuir al desorden— que la teoría debe describir. Esta es una idea interesante por sí misma, pero si seguimos esta línea de razonamiento un paso más, parece decimos algo muy extraño. Si la entropía máxima en cualquier región de espacio dada es proporcional al área de la superficie de dicha región, y no a su volumen, entonces quizá los verdaderos y fundamentales grados de libertad —los atributos que tienen el potencial de dar lugar a ese desorden— residen en realidad en la superficie de la región y no dentro de su volumen. Es decir, quizá los procesos físicos reales del universo tienen lugar en una delgada superficie lejana que nos rodea, y todo lo que vemos y experimentamos es meramente una proyección de dicho proceso. Es decir, quizá el universo es algo parecido a un holograma.

Esta es una idea extraña, pero como discutiremos ahora, ha recibido recientemente un apoyo sustancial.

¿Es el universo un holograma?

Un holograma es un trozo bidimensional de plástico grabado que, cuando se ilumina con una luz láser adecuada, proyecta una imagen tridimensional.[16.6] A comienzos de la década de 1990, el premio Nobel holandés Gerard ‘t Hooft y Leonard Susskind, el mismo físico que coinventó la teoría de

cuerdas, sugirieron que el propio universo podría actuar de una manera análoga a un holograma. Propusieron la idea sorprendente de que las idas y venidas que observamos en las tres dimensiones de la vida cotidiana podrían ser proyecciones holográficas de procesos físicos que tienen lugar en una superficie bidimensional lejana. En su nueva y peculiar visión, nosotros y todo lo que hacemos o vemos seríamos similares a imágenes holográficas. Platón imaginaba que las percepciones comunes revelan una mera sombra de la realidad; el principio holográfico coincide con esto, pero pone la metáfora del revés. Las sombras, las cosas que están aplanadas y por ello viven en una superficie de dimensión más baja —son reales, mientras que lo que parecen ser las entidades de dimensiones más altas y con más rica estructura (nosotros; el mundo que nos rodea) son proyecciones evanescentes de las sombras. [*49]

De nuevo, aunque es una idea fantásticamente extraña y una idea cuyo papel en la comprensión final del espaciotiempo no está ni mucho menos claro, el denominado *principio holográfico* de ‘t Hooft y Susskind está bien motivado. Pues, como discutimos en la última sección, la entropía máxima que una región del espacio puede contener escala con el área de su superficie, no con el volumen de su interior. Es natural conjeturar, entonces, que los ingredientes más fundamentales del universo, sus grados de libertad más básicos —las entidades que pueden portar la entropía del universo igual que las páginas de *Guerra y paz* portan su entropía— residiría en una superficie frontera y no en el interior del universo. Lo que experimentamos en el «volumen» del universo estaría determinado por lo que tiene lugar en la superficie frontera, de la misma forma que lo que vemos en una proyección holográfica está determinado por la información codificada en un trozo de plástico. Las leyes de la física actuarían como

el láser del universo, iluminando los procesos reales del cosmos —procesos que tienen lugar en una superficie delgada y distante— y generando las ilusiones holográficas de la vida diaria.

Todavía no hemos explicado cómo podría realizarse este principio holográfico en el mundo real. Un problema es que, en la descripción convencional del universo, se imagina que éste se prolonga indefinidamente, o si no, se enrolla sobre sí mismo como una esfera o una pantalla de videojuego (como en el capítulo 8), y así no tendría bordes ni fronteras. Entonces, ¿dónde estaría localizada la supuesta «superficie holográfica frontera»? Además, los procesos físicos parecen estar ciertamente bajo nuestro control, precisamente aquí, en el interior profundo del universo. No parece que algo en una frontera difícil de localizar sea de algún modo lo que manda en lo que sucede aquí en el volumen. ¿Implica el principio holográfico que *esta* sensación de control y autonomía es ilusoria? ¿O es mejor pensar que la holografía expresa una especie de dualidad en la que, sobre la base del gusto —no de la física— uno puede escoger entre una descripción familiar en la que las leyes fundamentales actúan aquí en el volumen (lo que se ajusta a la intuición y la percepción) *y* una descripción poco familiar en la que la física fundamental tiene lugar en alguna especie de frontera del universo, siendo igualmente válido cada punto de vista? Éstas son preguntas esenciales que siguen siendo controvertidas.

Pero en 1997, basado en ideas anteriores de varios teóricos de cuerdas, el físico argentino Juan Maldacena tuvo una idea que hizo avanzar de manera espectacular el pensamiento sobre estas cuestiones. Su descubrimiento no tiene relevancia directa para la cuestión del papel de la holografía en nuestro universo real, pero en la física tradicional él encontró un contexto hipotético —un universo

hipotético— en el que las reflexiones abstractas sobre la holografía podían hacerse precisas y concretas utilizando las matemáticas. Por razones técnicas, Maldacena estudió un universo hipotético con cuatro dimensiones espaciales grandes y una dimensión temporal que tiene una curvatura negativa uniforme —una versión en dimensiones más altas de las patatas fritas Pringle, figura 8.6c—. El análisis matemático estándar revela que este espaciotiempo pentadimensional tiene una frontera[16.7] que, como todas las fronteras, tiene una dimensión menos que la forma que limita: tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal. (Como siempre, los espacios de dimensiones más altas son difíciles de imaginar, de modo que si usted quiere una imagen mental, piense en una lata de sopa de tomate —la sopa líquida tridimensional es análoga al espaciotiempo pentadimensional, mientras que la superficie bidimensional de la lata es análoga a la frontera espaciotemporal tetradimensional—.) Después de incluir dimensiones enrolladas adicionales como requiere la teoría de cuerdas, Maldacena argumentó convincentemente que la física de la que sería testigo un observador que viviera dentro de este universo (un observador en la «sopa») podría describirse completamente en términos de física que tiene lugar en la frontera del universo (física en la superficie de la lata).

Aunque no es realista, este trabajo proporcionó el primer ejemplo concreto y matemáticamente tratable en el que el principio holográfico era explícitamente realizado.[16.8] Al hacerlo, arrojó mucha luz sobre la noción de holografía aplicada a un universo entero. Por ejemplo, en el trabajo de Maldacena la descripción de volumen y la descripción de la frontera están en absoluto pie de igualdad. No es una principal y la otra secundaria. En el mismo espíritu que la relación entre las cinco teorías de cuerdas, las teorías de volumen y de frontera son traducción una de otra. Sin

embargo, la característica inusual de esta traducción particular es que la teoría de volumen tiene más dimensiones que la teoría equivalente formulada en la frontera. Además, mientras que la teoría de volumen incluye la gravedad (puesto que Maldacena la formuló utilizando la teoría de cuerdas), los cálculos muestran que la teoría de la frontera no lo hace. No obstante, cualquier pregunta formulada o cualquier cálculo realizado en una de las teorías puede ser traducido a una pregunta o cálculo equivalente en la otra, Aunque alguien poco familiarizado con el diccionario pensaría que las preguntas y cálculos correspondientes no tienen absolutamente nada que ver entre sí (por ejemplo, puesto que la teoría de la frontera no incluye la gravedad, las preguntas que implican a la gravedad en la teoría de volumen se traducen en preguntas sin gravedad aparentemente muy diferentes en la teoría de la frontera), alguien versado en ambos lenguajes —un experto en ambas teorías— reconocería su relación y se daría cuenta de que las respuestas a preguntas correspondientes y los resultados de los cálculos correspondientes deben coincidir. De hecho, todos los cálculos hechos hasta la fecha, y se han hecho muchos, apoyan esta afirmación.

Los detalles de todo esto son difíciles de captar plenamente, pero no dejemos que oscurezcan el punto esencial. El resultado de Maldacena es sorprendente. El encontró una realización concreta, aunque hipotética, de la holografía dentro de la teoría de cuerdas. Demostró que una teoría cuántica particular sin gravedad es una traducción de —es indistinguible de— otra teoría cuántica que incluye a la gravedad pero está formulada con una dimensión espacial más. Hay ahora en marcha intensos programas de investigación para determinar cómo podrían aplicarse estas ideas a un universo más realista, nuestro universo, pero el

progreso es lento pues el análisis está lleno de obstáculos técnicos. (Maldacena escogió el ejemplo hipotético particular porque se mostraba relativamente fácil de analizar matemáticamente; los ejemplos más realistas son mucho más difíciles de tratar.) No obstante, ahora sabemos que la teoría de cuerdas, al menos en ciertos contextos, tiene la capacidad de apoyar el concepto de holografía. Y, como sucede con el caso de las traducciones geométricas antes descritas, esto proporciona otro indicio más de que el espaciotiempo no es fundamental. No sólo puede cambiar el tamaño y la forma del espaciotiempo en la traducción de una formulación de la teoría a otra forma equivalente, sino que también puede cambiar las dimensiones espaciales.

Además, estas claves apuntan a la conclusión de que la forma del espaciotiempo es un detalle ornamental que varía de una formulación de una teoría física a la siguiente, en lugar de ser un elemento fundamental de la realidad. Igual que el número de letras, sílabas y vocales en la palabra *gato* difiere de las de *cat,* su traducción inglesa, la forma del espaciotiempo —su forma, su tamaño e incluso el número de sus dimensiones— también cambia en la traducción. Para un observador dado que esté utilizando una teoría para pensar el universo, el espaciotiempo puede parecer real e indispensable. Pero si ese observador cambiara la formulación de la teoría que utiliza por una versión traducida equivalente, lo que una vez pareció real e indispensable también cambia necesariamente. Así pues, si estas ideas son correctas —y debería subrayar que aún tienen que ser rigurosamente demostradas incluso si los teóricos han reunido gran cantidad de evidencia en su apoyo— desafían con fuerza la primacía del espacio y el tiempo.

De todas las claves aquí discutidas, para mí es el principio holográfico el que tiene la mayor probabilidad de

desempeñar un papel dominante en la investigación futura. Emerge de una característica básica de los agujeros negros —su entropía— cuya comprensión, en eso coinciden muchos físicos, descansa sobre bases teóricas firmes. Incluso si los detalles de nuestras teorías cambiaran, confiamos en que cualquier descripción razonable de la gravedad permitiría que los agujeros negros, y con ello las cotas de entropía que dan pie a esta discusión, persistan y la holografía se aplique. El hecho de que la teoría de cuerdas incorpora de forma natural el principio holográfico —al menos en ejemplos susceptibles de análisis matemático— es otra prueba importante que sugiere la validez del principio. Yo espero que independientemente de dónde pueda llevamos la búsqueda de los fundamentos del espacio y el tiempo, independientemente de las modificaciones de la teoría M/de cuerdas que puedan estar esperándonos a la vuelta de la esquina, la holografía seguirá siendo un concepto guía.

Los constituyentes del espaciotiempo

A lo largo de este libro hemos aludido periódicamente a los constituyentes ultramicroscópicos del espaciotiempo pero, aunque hemos dado argumentos indirectos a favor de su existencia, aún tenemos que decir algo sobre cuáles podrían ser realmente dichos constituyentes. Y por una buena razón. En realidad, no tenemos ninguna idea de cuáles son. O, quizá debería decir, cuando se trata de identificar ingredientes elementales del espaciotiempo, no tenemos ninguna idea de en cuáles podemos confiar realmente. Ésta es una laguna importante en nuestra comprensión, pero vale la pena ver el problema en su contexto histórico.

Si usted hubiera hecho una encuesta entre los científicos de finales del siglo xix sobre sus opiniones acerca de los

constituyentes elementales de la materia, no habría encontrado un acuerdo universal. Hace un siglo la hipótesis atómica era controvertida; había científicos bien conocidos —Emst Mach era uno— que pensaban que era falsa. Además, ya desde que la hipótesis atómica recibió amplia aceptación en la primera parte del siglo xx, los científicos han estado actualizando continuamente la imagen que dicha hipótesis proporciona con los que se cree que son ingredientes cada vez más elementales (por ejemplo, primero protones y neutrones, luego quarks). La teoría de cuerdas es el último paso en este camino, pero puesto que aún tiene que ser confirmada experimentalmente (e incluso si lo fuera, eso no impediría la existencia de una teoría aún más refinada que espera desarrollo), debemos reconocer que la búsqueda de los constituyentes materiales básicos de la Naturaleza continúa.

La incorporación del espacio y el tiempo en un contexto científico moderno se remonta a Newton en el siglo xvn, pero una seria reflexión respecto a su constitución microscópica requirió los descubrimientos en el siglo xx de la relatividad general y la mecánica cuántica. Así, en escalas de tiempo históricas, sólo hemos empezado a analizar el espaciotiempo, de modo que la falta de una propuesta definitiva para sus «átomos» —los constituyentes más elementales del espaciotiempo— no supone una mala nota en este tema. Ni mucho menos. Lo que hemos obtenido hasta ahora —hemos revelado numerosas características del espacio y el tiempo mucho más allá de la experiencia común— testimonia un progreso incalculable respecto a hace un siglo. La búsqueda de los ingredientes más fundamentales de la Naturaleza, ya sea de la materia o del espaciotiempo, es un formidable desafío que probablemente nos ocupará durante bastante tiempo futuro.

En el caso del espaciotiempo, hay actualmente dos direcciones prometedoras en la búsqueda de constituyentes elementales. Una propuesta procede de la teoría de cuerdas y la otra procede de una teoría conocida como *gravedad cuántica de lazo.*

La propuesta de la teoría de cuerdas, dependiendo de cuánto reflexiones sobre ella, es o bien intuitivamente agradable o completamente desconcertante. Puesto que hablamos del «tejido» del espaciotiempo, dice la sugerencia, quizá el espaciotiempo está tejido con cuerdas de la misma forma que una camisa está tejida con hilo. Es decir, de la misma forma que unir numerosos hilos en una pauta adecuada produce el tejido de una camisa, quizá unir numerosas cuerdas en una pauta apropiada produzca lo que normalmente llamamos el tejido del espaciotiempo. La materia, como usted y yo, equivaldría entonces a aglomeraciones adicionales de cuerdas vibrantes —como música sonora tocada en un estruendoso silencio o una figura complicada bordada en un trozo liso de material— que se mueven dentro del contexto cosido por las cuerdas del espaciotiempo.

Para mí ésta es una propuesta atractiva y convincente, pero nadie ha transformado todavía estas palabras en un enunciado matemático preciso. Por lo que puedo decir, los obstáculos para hacerlo no son desdeñables. Por ejemplo, si su camisa se deshilacliara por completo usted se quedaría con un montón de hilo —un resultado que, dependiendo de las circunstancias, podría encontrar embarazoso o irritante, aunque probablemente no muy misterioso. Pero pone a la mente (al menos a mi mente) en un aprieto al pensar en la situación análoga con las cuerdas—, las hebras del espaciotiempo en esta propuesta. ¿Qué haríamos con un «montón» de cuerdas que se hubieran desenredado del tejido del espaciotiempo o, quizá más oportuno, no hubieran

llegado a unirse para producir el tejido del espaciotiempo? Podríamos tener la tentación de considerarlas como hacemos con el hilo de la camisa —como materia prima que necesita ser unida— pero eso pasa por alto una sutileza absolutamente esencial. Representamos las cuerdas vibrando en el espacio y a través del tiempo, pero sin el tejido del espaciotiempo que se supone que generan las propias cuerdas gracias a su unión ordenada, no hay espacio ni tiempo. En esta propuesta, los conceptos de espacio y tiempo dejan de tener significado hasta que se entretejen innumerables cuerdas para producirlos.

Así pues, para que esta propuesta tenga sentido necesitaríamos un marco para describir las cuerdas que no suponga de entrada que están vibrando en un espacio preexistente. Necesitaríamos una formulación totalmente aespacial y atemporal de la teoría de cuerdas, en la que el espaciotiempo emerge del comportamiento colectivo de las cuerdas.

Aunque ha habido progresos hacia este objetivo, nadie ha dado todavía con semejante formulación aespacial y atemporal de la teoría de cuerdas —algo que los físicos llaman una formulación *independiente del fondo* (el término procede de la vaga noción de espaciotiempo como telón de fondo ante el que tienen lugar los fenómenos físicos)—. En su lugar, prácticamente todas las aproximaciones conciben las cuerdas moviéndose y vibrando en un espaciotiempo que es introducido «a mano» en la teoría; el espaciotiempo no emerge de la teoría, como los físicos imaginan que lo haría en un marco independiente del fondo, sino que es suministrado a la teoría por el teórico. Muchos investigadores consideran que el desarrollo de una formulación independiente del fondo es el mayor problema no resuelto al que se enfrenta la teoría de cuerdas. No sólo daría una idea sobre el origen del espaciotiempo, sino que

un marco independiente del fondo sería probablemente instrumental para resolver el mayor cabo suelto encontrado al final del capítulo 12 —la incapacidad actual de la teoría para seleccionar la forma geométrica de las dimensiones extras—. Una vez que su formalismo matemático básico esté desenredado de cualquier espaciotiempo concreto, dice el razonamiento, la teoría de cuerdas debería tener la capacidad de examinar todas las posibilidades y quizá hacer una adjudicación entre ellas.

Otra dificultad a la que se enfrenta la propuesta cuerdas-como-hi- los-del-espaciotiempo es que, como aprendimos en el capítulo 13, la teoría de cuerdas tiene otros ingredientes además de las cuerdas. ¿Qué papel desempeñan estos otros componentes en la constitución fundamental del espaciotiempo? Esta pregunta adquiere un relieve especialmente claro en el escenario mundobrana. Si el espacio tridimensional en el que vivimos es una tres-brana, ¿es la propia brana imposible de descomponer o está formada a partir de la combinación de los otros ingredientes de la teoría? ¿Están hechas las branas, por ejemplo, de cuerdas, o son las branas tan elementales como las cuerdas? ¿O deberíamos considerar aún otra posibilidad, la de que branas y cuerdas pudieran estar hechas de algunos ingredientes aún más finos? Estas cuestiones están en la vanguardia de la investigación actual, pero puesto que este capítulo final trata de indicios y claves, déjeme señalar una idea relevante que ha recibido mucha atención.

Antes hablamos de las diversas branas que uno encuentra en la teoría M/de cuerdas: uno- branas, dos-branas, tres-branas, cuatro-branas y así sucesivamente. Aunque no lo resalté antes, la teoría también contiene cero-branas —ingredientes que no tienen extensión espacial, parecidos a partículas puntuales—. Esto podría parecer contradictorio con el espíritu global de la teoría M que se

alejaba del marco de la partícula puntual en un esfuerzo por domesticar las ondulaciones salvajes de la gravedad cuántica. Sin embargo, las cero-branas, igual que sus primas de dimensiones más altas en la figura 13.2, vienen con cuerdas unidas, literalmente, y así sus interacciones están gobernadas por cuerdas. No es sorprendente entonces que las cero-branas se comporten de modo muy diferente de las partículas puntuales convencionales y, lo que es más importante, participen plenamente en la dispersión y la reducción de las agitaciones espaciotemporales ultramicroscópicas; las cero-branas no introducen los defectos fatales que afligen a los esquemas de partícula puntual que intentan fusionar la mecánica cuántica y la relatividad general.

De hecho, Tom Banks de la Rutgers University y Willy Fischler de la Universidad de Texas en Austin, junto con Leonard Susskind y Stephen Shenker, ahora ambos en Standford, han formulado una versión de la teoría M/de cuerdas en la que cero-branas son los ingredientes fundamentales que pueden combinarse para generar cuerdas y otras branas de dimensión más alta. Esta propuesta, conocida como *teoría Matrix* —otro posible significado para la «M» en «teoría M»— ha generado una avalancha de investigación posterior, pero las difíciles matemáticas implicadas han impedido hasta ahora a los científicos llevar la aproximación hasta el final. No obstante, los cálculos que los físicos han logrado realizar en este marco parecen apoyar la propuesta. Si la teoría Matrix es verdadera, podría significar que todo —cuerdas, branas y quizá los propios espacio y tiempo— está compuesto de agregados adecuados de cero-branas. Es una perspectiva excitante, y los investigadores son cautamente optimistas en que el progreso durante los próximos años arrojará mucha luz sobre su validez.

Hasta ahora hemos examinado el camino que ha seguido la teoría de cuerdas en búsqueda de ingredientes espaciotemporales, pero como mencioné, hay un segundo camino procedente de la principal competidora de la teoría de cuerdas, la gravedad cuántica de lazo. La gravedad cuántica de lazo data de mediados de la década de 1980 y es otra propuesta prometedora para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica. No intentaré una descripción detallada (si usted está interesado, eche una mirada al excelente libro de Lee Smolin *Three Roads to Quantum Gravity),* sino que en su lugar mencionaré algunos puntos clave que son particularmente ilustrativos para nuestra discusión actual.

Tanto la teoría de cuerdas como la gravedad cuántica de lazo afirman haber conseguido el objetivo largo tiempo buscado de proporcionar una teoría cuántica de la gravedad, pero lo hacen de maneras diferentes. La teoría de cuerdas brotó de la tradición de la física de partículas exitosa que durante décadas ha buscado los ingredientes elementales de la materia; para la mayoría de los primeros investigadores en cuerdas, la gravedad tenía un interés secundario y lejano, en el mejor de los casos. Por el contrario, la gravedad cuántica de lazo brotó de una tradición firmemente basada en la teoría de la relatividad general; para la mayoría de quienes trabajan en esta aproximación, la gravedad ha sido siempre el interés principal. Un resumen comparativo diría que los teóricos de cuerdas empiezan con lo pequeño (teoría cuántica) y pasan a englobar lo grande (gravedad), mientras que quienes se adhieren a la gravedad cuántica de lazo empiezan con lo grande (gravedad) y pasan a englobar lo pequeño (teoría cuántica).[16.9] De hecho, como vimos en el capítulo 12, la teoría de cuerdas fue inicialmente desarrollada como una teoría cuántica de la fuerza nuclear fuerte que actúa dentro

de los núcleos atómicos; sólo más tarde se reconoció, por azar, que la teoría de cuerdas incluía realmente a la gravedad. La gravedad cuántica de lazo, por el contrario, toma la relatividad general de Einstein como punto de partida y trata de incorporar la mecánica cuántica.

Estos puntos de partida en extremos opuestos del espectro se reflejan en la forma en que las dos teorías se han desarrollado hasta ahora. En cierta medida, los principales logros de cada una resultan ser los fallos de la otra. Por ejemplo, la teoría de cuerdas une todas las fuerzas y toda la materia, incluyendo la gravedad (una unificación completa que evita la aproximación del lazo), al describir todo en el lenguaje de cuerdas vibrantes. La partícula de la gravedad, el gravitón, no es sino una pauta vibracional de cuerdas particular, y por eso la teoría describe de forma natural cómo estos paquetes elementales de gravedad se mueven e interaccionan mecanocuánticamente. Sin embargo, como se acaba de señalar, el principal defecto de las formulaciones actuales de la teoría de cuerdas es que presuponen un espaciotiempo de fondo dentro del que se mueven y vibran las cuerdas. Por el contrario, el logro principal de la gravedad cuántica de lazo —un logro impresionante— es que no supone un espaciotiempo de fondo. La gravedad cuántica de lazo es un marco independiente del fondo. Sin embargo, extraer el espacio y el tiempo ordinarios, así como las características familiares y satisfactorias de la relatividad general cuando se aplica sobre grandes escalas de distancia (algo fácil de hacer con las formulaciones actuales de la teoría de cuerdas), a partir de este punto de partida aespacial/atemporal extraordinariamente poco familiar, es un problema nada trivial, que los investigadores aún tratan de resolver. Además, en comparación con la teoría de cuerdas, la gravedad cuántica de lazo ha hecho muchos menos

progresos en la comprensión de la dinámica de los gravitones.

Una posibilidad armoniosa es que los entusiastas de las cuerdas y los aficionados a la gravedad cuántica de lazo estén construyendo en realidad la misma teoría, pero desde puntos de partida enormemente diferentes. Que cada teoría incluya lazos —en la teoría de cuerdas éstos son lazos de cuerda; en la gravedad cuántica de lazo son más difíciles de describir sin matemáticas, pero, hablando aproximadamente, son lazos elementales de espacio— sugiere que podría haber tal conexión. Esta posibilidad está apoyada además por el hecho de que en los pocos problemas accesibles a ambas, tales como la entropía de un agujero negro, las dos teorías están plenamente de acuerdo. **[16.10]** Y sobre la cuestión de los constituyentes del espaciotiempo ambas teorías sugieren que hay algún tipo de estructura atomizada. Ya hemos visto las claves que apuntan a esta conclusión que surgen de la teoría de cuerdas; las que proceden de la gravedad cuántica de lazo son atractivas e incluso más explícitas. Los investigadores de lazos han demostrado que muchos lazos en la gravedad cuántica de lazo pueden estar entremezclados, de modo parecido a minúsculos lazos de lana pegados en un jersey, y producir estructuras que, a escalas grandes, parecen aproximarse a regiones de espaciotiempo. Lo más convincente de todo, los investigadores de lazos han calculado las áreas permitidas de tales superficies del espacio. Y de la misma forma que usted puede tener un electrón o dos electrones o 202 electrones, pero no puede tener 1,6 electrones o cualquier otra fracción, los cálculos muestran que las superficies pueden tener áreas que son una longitud de Planck cuadrada, o dos longitudes de Planck cuadradas, o 202 longitudes de Planck cuadradas, pero no son posibles las fracciones. Una vez más, ésta es una fuerte

clave teórica de que el espacio, como los electrones, viene en pedazos discretos e indivisibles.[16.11]

Si tuviera aventurar una conjetura sobre los desarrollos futuros imaginaría que las técnicas independientes del fondo desarrolladas por la comunidad de la gravedad cuántica de lazo se adaptarán a la teoría de cuerdas, allanando el camino para una formulación de cuerdas que sea independiente del fondo. Y sospecho que ésa es la chispa que iniciará una tercera revolución de supercuerdas en la que, soy optimista, se resolverán muchos de los profundos misterios restantes. Tales desarrollos también harían probablemente que se cierre el círculo de la larga historia del espaciotiempo. En capítulos anteriores seguíamos el péndulo de la opinión mientras oscilaba entre las posiciones relacionista y absolutista sobre el espacio, el tiempo y el espaciotiempo. Preguntábamos: ¿es el espacio un algo o no lo es? ¿Es el espaciotiempo un algo o no lo es? Y, a lo largo de algunos siglos de reflexión encontramos opiniones diferentes. Yo creo que una unión independiente del fondo, confirmada experimentalmente, entre la relatividad general y la mecánica cuántica daría una solución satisfactoria a esta cuestión. En virtud de la independencia del fondo, los ingredientes de la teoría podrían guardar alguna relación entre sí, pero con la ausencia de un espaciotiempo que esté introducido de entrada en la teoría no habría ningún escenario de fondo en el que estuvieran inmersos. Sólo importarían las relaciones mutuas, una solución en el espíritu de los relacionistas como Leibniz y Mach. Luego, a medida que los ingredientes de la teoría —sean cuerdas, branas, lazos o alguna otra cosa descubierta en el curso de la investigación futura— se fusionen para producir un espaciotiempo familiar a gran escala (ya sea nuestro espaciotiempo real o ejemplos hipotéticos útiles para experimentos mentales), su ser

«algo» se recuperaría, igual que en nuestra anterior discusión de la relatividad general: en un espaciotiempo infinito, plano, por lo demás vacío (uno de los ejemplos hipotéticos útiles), el agua en el cubo giratorio de Newton adoptaría una forma cóncava. El punto esencial sería que la distinción entre espaciotiempo y entidades materiales más tangibles se evaporaría a medida que ambos emergieran de agregados adecuados de ingredientes más básicos en una teoría que es fundamentalmente relacional, sin espacio y sin tiempo. Si es así como sucede, Leibniz, Newton, Mach y Einstein podrían reclamar una parte de la victoria.

Espacio interior y espacio exterior

Especular sobre el futuro de la ciencia es un ejercicio entretenido y constructivo. Sitúa nuestros proyectos actuales en un contexto más amplio y resalta los objetivos primordiales en pos de los que estamos trabajando lenta y deliberadamente. Pero cuando tales especulaciones se dirigen al propio futuro del espaciotiempo, adquieren una cualidad casi mística: estamos considerando el futuro de las cosas mismas que dominan nuestro sentido de la realidad. De nuevo no se cuestiona que, independientemente de los descubrimientos futuros, el espacio y el tiempo seguirán enmarcando nuestra experiencia individual; espacio y tiempo, por lo que respecta a la vida cotidiana, están aquí para quedarse. Lo que seguirá cambiando, y probablemente cambiando drásticamente, es nuestra comprensión del marco que ofrecen —es decir, el escenario de la realidad de la experiencia—. Tras siglos de pensamiento, sólo podemos retratar al espacio y el tiempo como los más familiares entre los extraños. Siguen su camino imperturbables a través de nuestra vida, pero ocultan hábilmente su

constitución fundamental a las propias percepciones en las que tan decisivamente influyen.

Durante el último siglo hemos llegado a estar íntimamente familiarizados con algunas características previamente ocultas del espacio y el tiempo gracias a las dos teorías de la relatividad de Einstein y a la mecánica cuántica. El frenado del tiempo, la relatividad de la simultaneidad, los rebanamientos alternativos del espaciotiempo, la gravedad como deformación y curvatura del espacio y el tiempo, la naturaleza probabilista de la realidad, y el entrelazamiento cuántico a larga distancia no estaban en la lista de cosas que incluso el mejor de los físicos del mundo del siglo xix hubiera esperado encontrar a la vuelta de la esquina. Y pese a todo, ahí estaban, como dan testimonio tanto los resultados experimentales como las explicaciones teóricas.

En nuestra época hemos dado con nuestra propia panoplia de ideas inesperadas: materia oscura y energía oscura que parecen ser, con mucho, los constituyentes dominantes del universo. Ondas gravitatorias —rizos en el tejido del espaciotiempo— que fueron predichas por la relatividad general de Einstein y quizá un día nos permitan mirar más atrás en el tiempo que nunca. Un océano de Higgs, que permea todo el espacio y que si se confirmara nos ayudará a entender cómo las partículas adquieren masa. Expansión inflacionaria, que puede explicar la forma del cosmos, resolver el enigma de por qué es tan uniforme a grandes escalas y fijar la dirección de la flecha del tiempo. La teoría de cuerdas, que postula lazos y trozos de energía en lugar de partículas puntuales y promete una versión atrevida del sueño de Einstein en el que todas las partículas y todas las fuerzas se combinan en una única teoría. Dimensiones espaciales extras, que emergen de las matemáticas de la teoría de cuerdas, y que quizá puedan

detectarse en experimentos en aceleradores durante la próxima década. Un mundobrana, en el que nuestras tres dimensiones espaciales quizá sean un universo entre muchos, flotando en un espaciotiempo de más dimensiones. Y quizá un espaciotiempo emergente, en el que el propio tejido del espacio y el tiempo está compuesto de entidades más fundamentales aespaciales y atemporales.

Durante la próxima década, aceleradores cada vez más potentes harán una aportación experimental muy necesaria, y muchos físicos confían en que los datos recogidos de las colisiones a alta energía para los que se han diseñado confirmarán varias de estas construcciones teóricas. Yo comparto este entusiasmo y espero ávidamente los resultados. Hasta que no entren en contacto con fenómenos observables y verificables, nuestras teorías permanecen en el limbo —siguen siendo prometedores conjuntos de ideas que pueden o no tener relevancia para el mundo real—. Los nuevos aceleradores adelantarán el solapa- miento entre teoría y experimento de forma sustancial y, esperamos, acomodarán muchas de estas ideas en el dominio de la ciencia establecida.

Pero hay otra aproximación que, aunque a más largo plazo, me llena de un asombro incomparable. En el capítulo 11 discutimos cómo pueden verse los efectos de minúsculas agitaciones cuánticas en un claro cielo nocturno puesto que están enormemente estirados por la expansión cósmica, dando como resultado grumos que constituyen las semilla para la formación de estrellas y galaxias. (Recordemos la analogía de pequeños garabatos, dibujados en un globo, que se estiran a lo largo de su superficie cuando el globo se hincha.) Esta idea da acceso a la física cuántica por medio de observaciones astronómicas. Quizá pueda ser llevada aún más lejos. Quizá la expansión cósmica pueda estirar las huellas de procesos o características de escala aún menor

—la física de cuerdas, o la gravedad cuántica con más generalidad, o la estructura atomizada del propio espaciotiempo ultramicros- cópico— y ampliar su influencia, de alguna manera sutil pero observable, a lo largo de los cielos. Es decir, quizá el universo ha extraído ya fibras microscópicas del tejido del cosmos y las ha desplegado a lo largo del cielo, y todo lo que necesitamos es aprender a reconocer la pauta.

Evaluar las propuestas de vanguardia para leyes físicas profundas muy bien puede requerir la potencia feroz de aceleradores de partículas capaces de recrear violentas condiciones no vistas desde instantes después del *big bang.* Pero para mí no habría nada más poético, ningún resultado más agradable, ninguna unificación más completa, que llegar a confirmar nuestras teorías de lo ultrapequeño —nuestras teorías sobre la constitución ultramicroscópica del espacio, el tiempo y la materia— orientando nuestros más potentes telescopios al cielo y mirando silenciosamente a las estrellas.



BRIAN RANDOLPH GREENE (nacido el 9 de febrero de 1963) es un físico teórico, matemático y teórico de cuerdas estadounidense. Es profesor en la Universidad de Columbia desde 1996 y presidente cofundador del *World Science Festival* desde 2008. Greene ha trabajado en simetría especular, relacionando dos variedades Calabi-Yau diferentes.

Greene se ha hecho conocido gracias a sus libros divulgativos, *El Universo Elegante*, *Icarus at the Edge of Time*, *El Tejido del Cosmos*, *La realidad oculta* y programas especiales en la televisión pública estadounidense PBS y en la serie de NatGeo *Más allá del cosmos* y *El tejido del cosmos*. También apareció en el vigésimo episodio de la cuarta temporada de *The Big Bang Theory*, así como en las películas *Frequency* y *The Last Mimzy*. Es miembro

actualmente de la junta de patrocinadores del *Bulletin of the Atomic Scientists*.

Brian Greene se licenció en la Universidad de Harvard y se doctoró en la Universidad de Oxford, donde fue becario Rhodes. Se unió a la facultad de física de la Universidad de Cornell en 1990, fue nombrado profesor titular en 1995, y en 1996 se unió a la Universidad de Columbia donde es profesor de física y matemáticas. Ha dado conferencias tanto a nivel general como técnico en más de veinticinco países y es ampliamente considerado por un número de descubrimientos innovadores en la teoría de las supercuerdas. Vive en los Andes, Nueva York y la ciudad de Nueva York.

Notas

Capítulo 1

[1.1] Lord Kelvin fue citado por el físico Albert Michelson en su alocución en 1894 con motivo de la dedicatoria del Laboratorio Ryerson de la Universidad de Chicago (ver D. Kleppner, Physics Today, noviembre 1998). **<<**

[1.2] Lord Kelvin, «Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light», Phil. Mag. li —6th series, 1 (1901). **<<**

[1.3] A. Einstein, N. Rosen y B. Podolsky, Phys. Rev. 47, 777 (1935). **<<**

[1.4] Sir Arthur Eddington, The Nature ofthe Physical World (Cambridge, Cambridge University Press, 1928). [Hay trad. cast.: La Naturaleza del Mundo Físico, Editorial Sudamericana, Buenos Aires, 1945 (agotado).] **<<**

[1.5] Como se describe con más detalle en la nota 2 del capítulo 6, esto es una exageración porque hay ejemplos, referidos a partículas relativamente esotéricas (tales como los mesones K o los mesones B), que muestran que la denominada fuerza nuclear débil no trata el pasado y el futuro de forma completamente simétrica. Sin embargo, en mi opinión y la de muchos otros que han reflexionado sobre ello, puesto que estas partículas no desempeñan básicamente ningún papel en la determinación de las propiedades de los objetos materiales cotidianos, es poco probable que sean importantes para explicar el enigma de la flecha del tiempo (aunque, me apresuro a añadir, nadie lo sabe con seguridad). De modo que aunque técnicamente es una exageración, supondré todo el tiempo que el error cometido al afirmar que las leyes tratan pasado y futuro en pie de igualdad es mínimo —al menos en lo que respecta a explicar el enigma de la flecha del tiempo. **<<**

[1.6] T. Ferris, Corning ofAge in the Milky Way (Nueva York, Anchor, 1989). **<<**

Capítulo 2

[2.1] Isaac Newton, Sir Isaac Newton’s Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World, trans. A. Motte and Florian Cajori (Berkeley, University of California Press, 1934), vol I, p. 10. [Hay edición en castellano de los Principia: Principios Matemáticos de la Filosofía Natural, edición de Eloy Rada, Alianza, Madrid, 1988.] **<<**

[2.2] Isaac Newton, Sir Isaac Newton’s Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World, trans. A. Motte and Florian Cajori (Berkeley, University of California Press, 1934), vol I, p. 6. **<<**

[2.3] Isaac Newton, Sir Isaac Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World, trans. A. Motte and Florian Cajori (Berkeley, University of California Press, 1934), vol I, p. 10. [Hay edición en castellano de los Principia: Principios Matemáticos de la Filosofía Natural, edición de Eloy Rada, Alianza, Madrid, 1988.] **<<**

[2.4] Isaac Newton, Sir Isaac Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World, trans. A. Motte and Florian Cajori (Berkeley, University of California Press, 1934), vol I, p. 12. **<<**

[2.5] Albert Einstein, en Prólogo a Max Jammer, Concepts of Space: The Histories ofTheories of Space in Physics (Nueva York, Dover, 1993). **<<**

[2.6] A. Rupert Hall, Isaac Newton, Adventurer in Thought (Cambridge, Cambridge University Press, 1992), p. 1.927.
<<

[2.7] A. Rupert Hall, Isaac Newton, Adventurer in Thought (Cambridge, Cambridge University Press, 1992), p. 1.927..
<<

[2.8] H. G. Alexander, ed., The Leibniz-Clarke Correspondence (Manchester, Manchester University Press, 1956). **<<**

[2.9] Me centro en Leibniz como representante de quienes se oponían a atribuir al espacio una existencia independiente de los objetos que lo habitan, pero esta opinión también era defendida enérgicamente por muchos otros, entre ellos Christian Huygens y el Obispo Berkeley. **<<**

[2.10] Ver, por ejemplo, Max Jammer, p. 116. **<<**

[2.11] V. I. Lenin, Materialism and Empirocriticism: Critical Comments on a Reactionary Philosophy (Nueva York, International Publications, 1909). Segunda edición inglesa de Materializm’ i Empirokrititzism’: Kriti-cheskia Zametki ob’ Odnoi Reaktsionnoi Filosofii (Moscú, Zveno Press, 1909). [Hay edición en castellano: Materialismo y Empirocriticismo, Editorial Fundamentos, Madrid, 1974.] **<<**

Capítulo 3

[3.1] Para el lector con formación matemática estas cuatro ecuaciones son

$$\nabla \cdot E = \rho/\varepsilon_0,\ \nabla \cdot B = 0,\ \nabla \times E + \partial B/\partial t = 0,\ \nabla \times B - \varepsilon_0\mu_0 \partial E/\partial t = \mu_0 J,$$

donde

$$E,\ B,\ \rho,\ J,\ \varepsilon_0,\ \mu_0$$

denotan el campo eléctrico, el campo magnético, la densidad de carga eléctrica, la densidad de corriente eléctrica, la permitividad del espacio libre y la permeabilidad del espacio libre, respectivamente. Como puede verse, las ecuaciones de Maxwell relacionan la velocidad de cambio de los campos electromagnéticos con la presencia de cargas y corrientes eléctricas. No es difícil demostrar que estas ecuaciones implican una velocidad para las ondas electromagnéticas dada por $1/(\varepsilon_o\mu_o)^{1/2}$, cuyo valor da de hecho la velocidad de la luz. **<<**

[3.2] Hay cierta controversia en cuanto al papel que tales experimentos desempeñaron en el desarrollo de la relatividad especial por parte de Einstein. En su biografía de Einstein Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein (Oxford, Oxford University Press, 1982), Abraham Pais sostiene, utilizando las propias declaraciones de Einstein en sus últimos años, que éste conocía el resultado de Michelson-Morley. Albrecht Folsing en Albert Einstein: A Biography (Nueva York, Viking, 1997), pp. 217-220, argumenta también que Einstein conocía el resultado de Michelson-Morley, así como anteriores resultados nulos experimentales en busca de evidencia del éter, tales como el trabajo de Armand Fizeau. Pero Fólsing y muchos otros historiadores de la ciencia han argumentado también que tales experimentos desempeñaron, como mucho, un papel secundario en el pensamiento de Einstein. Einstein estaba principalmente guiado por consideraciones de simetría matemática, simplicidad y una extraordinaria intuición física. **<<**

[3.3] Para que nosotros veamos algo, la luz tiene que viajar hasta nuestros ojos; análogamente, para que veamos luz, la propia luz tendría que hacer el mismo viaje. Así, cuando yo digo que Bart ve la luz que se está alejando, es una forma de abreviar. Estoy imaginando que Bart tiene un pequeño ejército de ayudantes, todos ellos moviéndose a la velocidad de Bart pero situados a diversas distancias a lo largo del camino que siguen él y el rayo de luz. Estos ayudantes ponen al día a Bart acerca de la velocidad que llevaba la luz y el momento en que la luz alcanzó tales lugares distantes. Entonces, sobre la base de esa información, Bart puede calcular con qué rapidez se está alejando la luz de él. **<<**

[3.4] Hay muchas deducciones matemáticas elementales de las ideas de Einstein acerca del espacio y el tiempo que surgen de la relatividad especial. Si está interesado puede echar, por ejemplo, una mirada al capítulo 2 de El universo elegante (y a los detalles matemáticos que se dan en las notas finales a ese capítulo). Una exposición más técnica pero extraordinariamente lúcida es Edwin Taylor y John Archibald Wheeler, Spacetime Phy-sics: Introduction to Special Relativity (Nueva York, W. H. Freeman & Co., 1992). **<<**

[3.5] La detención del tiempo a la velocidad de la luz es una noción interesante, pero es importante no ver demasiado en ello. La relatividad especial demuestra que ningún objeto material puede alcanzar nunca la velocidad de la luz: cuanto más rápido viaja un objeto material, más difícil será empujarlo para que aumente su velocidad. Si fuera casi a la velocidad de la luz, tendríamos que dar al objeto un empujón esencialmente infinito para que fuera más rápido, y eso es algo que nunca podemos hacer. Así, la perspectiva «atemporal» del fotón está limitada a objetos sin masa (de los que el fotón es un ejemplo), y así la «atemporalidad» está permanentemente más allá de lo que ninguna partícula, salvo unos pocos tipos, puede alcanzar. Aunque es un ejercicio interesante y frudtífero imaginar cómo sería el universo cuando nos movemos a la velocidad de la luz, finalmente necesitamos centramos en perspectivas que los objetos materiales, tales como nosotros mismos, pueden alcanzar, si queremos extraer inferencias de cómo afecta la relatividad especial a nuestra experiencia del tiempo. **<<**

[3.6] Ver Abraham Pais, Subtle is the Lord, pp. 113-114. **<<**

[3.7] Para ser más exactos, definimos que el agua está girando si adopta una forma cóncava, y que no está girando si no lo hace. Desde una perspectiva machiana, en un universo vacío no hay concepto de giro, de modo que la superficie del agua siempre sería plana (o, para evitar cuestiones derivadas de la falta de la gravedad que tira del agua, podemos decir que la cuerda atada entre dos piedras siempre estará flácida). Lo que importa aquí es que, por el contrario, en la relatividad especial hay una noción de rotación, incluso en un universo vacío, de modo que la superficie del agua puede ser cóncava (y la cuerda atada entre las piedras puede estar tensa). En este sentido, la relatividad especial viola las ideas de Mach. **<<**

[3.8] Albrecht Fólsing, Albert Einstein (Nueva York, Viking Press, 1967), pp. 208-210. **<<**

[3.9] El lector con inclinación matemática advertirá que si escogemos las unidades de modo que la velocidad de la luz toma la forma de una unidad de espacio por una unidad de tiempo (como un año-luz por año o un segundo-luz por segundo, donde un año-luz es aproximadamente 9 billones y medio de kilómetros y un segundo-luz es aproximadamente 300.000 kilómetros), entonces la luz se mueve a través del espaciotiempo en rayos inclinados a 45 grados (porque tales líneas diagonales son las que cubren una unidad de espacio en una unidad de tiempo, dos unidades de espacio en dos unidades de tiempo, etc.). Puesto que nada puede superar la velocidad de la luz, cualquier objeto material debe cubrir menos distancia en el espacio en un intervalo de tiempo dado que la que cubriría un rayo de luz, y por eso la trayectoria que sigue a través del espaciotiempo debe formar un ángulo con la línea central del diagrama (la línea que recorre el centro de la barra de corteza a corteza) menor de 45 grados.

Además, Einstein demostró que las rebanadas de tiempo para un observador que se mueve con velocidad v —todo el espacio en un instante de tiempo de tal observador— tienen una ecuación (suponiendo por simplicidad una dimensión espacial) dada por $t_{movimiento} = \gamma(t_{reposo} - (v/c^2)x_{reposo})$, donde $\gamma=(1-v^2/c^2)^{1/2}$, y c es la velocidad de la luz. En unidades donde $c = 1$, notamos que $v < 1$ y por eso una rebanada temporal para el observador en movimiento —el lugar geométrico donde $t_{movimiento}$ toma un valor fijo— es de la forma $(t_{reposo} - v\, x_{reposo})$= constante. Tales rebanadas temporales están inclinadas con respecto a las rebanadas temporales en reposo (los lugares geométricos de la forma t_{reposo} = constante), y puesto que $v < c$, el ángulo entre

ellas es menor que 45 grados. **<<**

[3.10] Para el lector con inclinación matemática, lo que se está afirmando es que las geodésicas del espaciotiempo de Minkowski —las trayectorias de longitud espaciotemporal extrema entre dos puntos dados— son entidades geométricas que no dependen de ninguna elección particular de coordenadas o sistema de referencia. Son características intrínsecas, absolutas y geométricas del espaciotiempo. Explícitamente, utilizando la métrica de Minkowski estándar, las geodésicas (de género espacio) son líneas rectas (cuyo ángulo con respecto al eje de tiempo es menor de 45 grados, puesto que la velocidad implicada es menor que la de la luz). **<<**

[3.11] Hay algo más de importancia en lo que todos los observadores, independientemente de su movimiento, también estarán de acuerdo. Está implícito en lo que hemos descrito, pero vale la pena afirmarlo directamente. Si un suceso es causa de otro (yo tiro una piedra que hace que se rompa una ventana), todos los observadores están de acuerdo en que la causa precedió al efecto (todos los observadores estarán de acuerdo en que yo tiré la piedra antes de que se rompiese la ventana). Para el lector con inclinación matemática, no es realmente difícil ver esto utilizando nuestra representación esquemática del espaciotiempo. Si el suceso A es la causa del suceso B, entonces una recta trazada de A a B corta a cada una de las rebanadas de tiempo (rebanadas de tiempo de un observador en reposo con respecto a A) a un ángulo mayor de 45 grados (el ángulo entre los ejes espaciales —ejes que están en cualquier rebanada de tiempo dada— y la recta entre A y B es mayor que 45 grados). Por ejemplo, si A y B tienen lugar en la misma localización en el espacio (la goma elástica enrollada en mi dedo [A] hace que mi dedo se ponga blanco [B]) entonces la línea que conecta A y B forma un ángulo de 90 grados con respecto a las rebanadas de tiempo. Si A y B tienen lugar en diferentes lugares en el espacio, cualquier cosa que viajó de A a B para ejercer la influencia (mi piedra que viaja desde el tirachinas a la ventana) lo hizo a velocidad menor que la de la luz, lo que significa que el ángulo difiere de 90 grados (el ángulo cuando no hay ninguna velocidad implicada) en menos de 45 grados —por ejemplo, el ángulo con respecto a las rebanadas de tiempo (los ejes espaciales) es mayor que 45 grados—. (Recuerde de la nota final 9 de este capítulo que

la velocidad de la luz fija el límite y dicho movimiento traza líneas de 45 grados.) Ahora, como en la nota final 9, las diferentes rebanadas de tiempo asociadas con un observador en movimiento están inclinadas con respecto a las de un observador en reposo, pero el ángulo es siempre menor que 45 grados (puesto que el movimiento relativo entre dos observadores materiales es siempre menor que la velocidad de la luz). Y puesto que el ángulo asociado con sucesos causalmente relacionados es siempre mayor que 45 grados, las rebanadas de tiempo del observador, que necesariamente viaja a velocidad menor que la de la luz, no pueden encontrar el efecto primero y encontrar la causa más tarde. Para todos los observadores la causa precederá al efecto. **<<**

[3.12] La noción de que las causas preceden a sus efectos (ver la nota precedente) sería cuestionada, entre otras cosas, si las influencias pudieran viajar más rápido que la velocidad de la luz. **<<**

[3.13] Isaac Newton, Sir Isaac Newton ’s Mathematical Principipies of Natural Philosophy and His System ofthe World, trans. A. Motte and Florian Ca-jori (Berkeley, University of California Press, 1934), vol I, p. 634. **<<**

[3.14] Puesto que la atracción gravitatoria de la Tierra difiere de un lugar a otro, un observador en caída libre, con extensión espacial, aún puede detectar una influencia gravitatoria residual. A saber: si el observador, mientras cae, suelta dos pelotas de béisbol —una desde su brazo derecho extendido y la otra desde su brazo izquierdo— cada una de ellas caerá a lo largo de una trayectoria dirigida hacia el centro de la Tierra. Así, desde la perspectiva del observador, él estará cayendo directamente hacia el centro de la Tierra, mientras que la pelota liberada de su mano izquierda viajará hacia abajo y ligeramente hacia la izquierda y la pelota liberada de su mano izquierda viajará hacia abajo y ligeramente hacia la derecha. Así, mediante medidas cuidadosas, el observador verá que la distancia entre las dos pelotas disminuye lentamente; se mueven una hacia otra. No obstante, para este efecto es crucial que las bolas se liberen en lugares ligeramente diferentes en el espacio, de modo que sus trayectorias en caída libre hacia el centro de la Tierra sean también ligeramente diferentes. Así, un enunciado más preciso de la idea de Einstein es que cuanto menor es la extensión espacial de un objeto, más completamente puede eliminar la gravedad desplomándose en caída libre. Aunque es un punto importante, esta complicación puede ser ignorada sin problemas en la discusión. **<<**

[3.15] Para una explicación más detallada, aunque a un nivel general, de la curvatura del espacio y el tiempo según la relatividad general, ver, por ejemplo, el capítulo 3 de El universo elegante. **<<**

[3.16] Para el lector con formación matemática las ecuaciones de Einstein son $G_{mv} = (8kG/c^4)T_{uv}$, donde el primer miembro describe la curvatura del espaciotiempo utilizando el tensor de Einstein y el segundo miembro describe la distribución de materia y energía en el universo utilizando el tensor energía-momento. **<<**

[3.17] Charles Misner, Kip Thome y John Archibald Wheeler, Gravitation, (San Francisco, W.H. Freeman and Co., 1973), pp. 544-545. **<<**

[3.18] En 1954 Einstein escribió a un colega: «De hecho, uno ya no debería hablar del principio de Mach en absoluto» (citado en Abraham Pais, Sub-tle is the Lord, p. 288). **<<**

[3.19] Como se mencionó antes, sucesivas generaciones han atribuido las ideas siguientes a Mach incluso si sus propios escritos no expresan las cosas explícitamente de esta manera. **<<**

[3.20] Un matiz aquí es que objetos que están tan lejanos que no ha habido tiempo suficiente desde el comienzo del universo para que su luz —o influencia gravitatoria— nos h^{av}a llegado no tienen ningún impacto sobre la gravedad que sentimos. **<<**

[3.21] El lector experto reconocerá que este enunciado es, técnicamente hablando, demasiado fuerte, pues no hay soluciones no triviales en el espacio vacío (es decir, el espacio no-Minkowski) para la relatividad general. Aquí estoy utilizando simplemente el hecho de que la relatividad especial puede considerarse un caso especial de la relatividad general en el que se ignora la gravedad. **<<**

[3.22] Para ser ecuánime, déjeme señalar que hay físicos y filósofos que no están de acuerdo con esta conclusión. Incluso si Einstein abandonó el principio de Mach, durante los últimos 30 años ha cobrado vida por sí mismo. Se han propuesto varias versiones e interpretaciones de la idea de Mach y, por ejemplo, algunos físicos han sugerido que la relatividad general engloba básicamente las ideas de Mach; se trata simplemente de que algunas formas particulares que puede tener el espaciotiempo —tal como el espaciotiempo plano infinito de un universo vacío— no lo hacen. Quizá, sugieren estos físicos, cualquier espaciotiempo que sea remotamente realista —poblado por estrellas y galaxias, y todo lo demás— sí satisface el principio de Mach.

Otros han presentado reformulaciones del principio de Mach en el que la cuestión ya no es cómo se comportan los objetos, tales como piedras atadas por una cuerda o cubos llenos de agua, en un universo por lo demás vacío, sino más bien cómo las diversas rebanadas de tiempo —las diversas geometrías espaciales tridimensionales— se relacionan mutuamente a través del tiempo. Una referencia iluminadora sobre el pensamiento moderno acerca de estas ideas es Mach ’s Principie: From Newton ’s Bucket to Quantum Gravity, Julián Barbour and Herbert Pfister, eds. (Berlín, Birkháuser, 1995), que es una colección de ensayos sobre el tema. Una parte interesante de esta referencia es una encuesta entre aproximadamente cuarenta físicos y filósofos acerca de su opinión sobre el principio de Mach. La mayoría (más del 90 por 100) coincidían en que la relatividad general no se ajusta plenamente a las ideas de Mach. Otra discusión excelente y extraordinariamente

interesante de estas ideas, desde una perspectiva decididamente pro-machiana y de un nivel apropiado para el gran público, es el libro de Julián Barbour The End of Time (Oxford, Oxford University Press, 1999). **<<**

[3.23] El lector con inclinación matemática podría encontrar ilustrativo saber que Einstein creía que el espaciotiempo no tenía existencia independiente de su métrica (el artificio matemático que da las relaciones de distancia en el espaciotiempo), de modo que si se eliminara todo —incluyendo la métrica— el espaciotiempo no sería un algo. Por «espaciotiempo» entiendo siempre una variedad junto con una métrica que es solución de las ecuaciones de Einstein, y por eso la conclusión a la que hemos llegado, en lenguaje matemático, es que el espaciotiempo métrico es un algo. **<<**

[3.24] Max Jammer, Concepts of Space, p. xvn. **<<**

Capítulo 4

[4.1] Con más exactitud, ésta parece ser una concepción medieval con raíces históricas que se remontan a Aristóteles. **<<**

[4.2] Como discutiremos más adelante en este libro, hay dominios (tales como el big bang y los agujeros negros) que aún presentan muchos misterios, debido en parte a las condiciones extremas de tamaño pequeño y densidades enormes que hacen que incluso la teoría más refinada de Einstein deje de ser válida. Así, la afirmación se aplica a todos los contextos salvo los más extremos en los que las propias leyes conocidas se hacen sospechosas. **<<**

[4.3] Un primer lector de este texto que, sorprendentemente, tiene un especial conocimiento del vudú, me ha informado de que en este rito se supone que algo va de un lugar a otro llevando las intenciones de quien practica el vudú: a saber, un espíritu. De modo que mi ejemplo de un fantástico proceso no local puede fallar, dependiendo de su consideración del vudú. No obstante, la idea es clara. **<<**

[4.4] Para evitar cualquier confusión, permítame volver a resaltar de entrada que cuando digo, «El universo es no local», o «Algo que hacemos aquí puede estar entrelazado con algo allí», no me estoy refiriendo a la capacidad de ejercer un control intencionado instantáneo sobre algo lejano. En lugar de ello, como quedará claro, el efecto al que me estoy refiriendo se manifiesta como correlaciones entre sucesos que tienen lugar —habitualmente en forma de correlaciones entre resultados de medidas— en localizaciones distantes (localizaciones para las que no habría tiempo suficiente para que ni siquiera la luz viajara de una a la otra). Me estoy refiriendo, pues, a lo que los físicos llaman correlaciones no locales. A primera vista, tales correlaciones quizá no le parezcan particularmente sorprendentes. Si alguien le envía una caja que contiene un miembro de un par de guantes, y envía el otro miembro del par a un amigo suyo que está a miles de kilómetros, habrá una correlación entre la mano del guante que ve cada uno de ustedes al abrir sus cajas respectivas: si usted ve el guante izquierdo, su amigo verá el derecho; si usted ve el derecho, su amigo verá el izquierdo. Y, evidentemente, nada en estas correlaciones es misterioso. Pero, como iremos describiendo, las correlaciones que se dan en el mundo cuántico parecen ser de una naturaleza muy diferente. Es como si usted tuviera un par de «guantes cuánticos» en el que cada miembro puede ser o bien de mano izquierda o bien de mano derecha, y adquiere una mano definida sólo cuando es adecuadamente observado o se interacciona con él. La extrañeza aparece porque, aunque cada guante parece escoger su mano al azar cuando es observado, los guantes trabajan en conjunto,

incluso si están ampliamente separados: si uno escoge izquierda, el otro escoge derecha, y viceversa. **<<**

[4.5] La mecánica cuántica hace predicciones sobre el micromundo que están en fantástico acuerdo con las observaciones experimentales. Sobre esto hay un consenso universal. No obstante, puesto que las características detalladas de la mecánica cuántica, que se discuten en este capítulo, difieren significativamente de aquellas de la experiencia común y, además, puesto que hay diferentes formulaciones matemáticas de la teoría (y diferentes formulaciones de cómo llena la teoría el hueco entre el micromundo de los fenómenos y el macromundo de los resultados medidos), no hay consenso en cómo interpretar varios aspectos de la teoría (y varios datos enigmáticos que la teoría es capaz, no obstante, de explicar matemáticamente), incluyendo cuestiones de no localidad. En este capítulo he adoptado un punto de vista concreto, el que me resulta más convincente, basado en el conocimiento teórico y los resultados experimentales actuales. Pero advierto en que no todos están de acuerdo con esta opinión, y en una nota final posterior, después de explicar la perspectiva con más detalle, señalaré brevemente algunas de las otras perspectivas e indicaré dónde puede usted leer más sobre ellas. Déjeme resaltar también, como se discutirá más adelante, que los experimentos contradicen la creencia de Einstein en que los datos sólo podrían ser explicados sobre la base de partículas que siempre poseen propiedades definidas, aunque ocultas, sin ningún uso o mención de entrelazamiento no local. Sin embargo, el fracaso de esta perspectiva sólo descarta un universo local. No descarta la posibilidad de que las partículas tengan esas características ocultas definidas. **<<**

[4.6] Para el lector con inclinación matemática, déjeme señalar un aspecto potencialmente equívoco de esta descripción. Para sistemas de muchas partículas, la onda de probabilidad (la función de onda en terminología estándar) tiene esencialmente la misma interpretación que se acaba de describir, pero se define como una función en el espacio de configuración de las partículas (para una única partícula, el espacio de configuración es isomorfo al espacio real, pero para un sistema de N partículas tiene 3N dimensiones). Es importante tener esto en mente cuando se reflexiona sobre si la función de onda es una entidad física real o meramente un artificio matemático, puesto que si uno adopta la primera postura, necesitará aceptar también la realidad del espacio de configuración —una variante interesante de los temas de los capítulos 2 y 3—. En la teoría cuántica de campos relativista, los campos pueden definirse en las cuatro dimensiones espaciotemporales habituales de la experiencia común, pero hay también formulaciones menos utilizadas que apelan a funciones de onda generalizadas denominadas funcionales de onda definidos en un espacio aún más abstracto, el espacio de campos. **<<**

[4.7] Los experimentos a los que me refiero son aquellos sobre el efecto fotoeléctrico, en los que la luz que incide sobre varios metales hace que sean expulsados electrones de la superficie del metal. Los experimentadores encontraron que cuanto mayor es la intensidad de la luz, mayor es el número de electrones emitidos. Además, los experimentos revelaron que la energía de cada electrón expulsado estaba determinada por el color —la frecuencia— de la luz. Esto, como argumentó Einstein, es fácil de entender si la luz está compuesta de partículas, puesto que mayor intensidad luminosa se traduce en más partículas de luz (más fotones) en el haz —y cuantos más fotones hay, a más electrones golpearán y expulsarán de la superficie metálica—. Además, la frecuencia de la luz determinaría la energía de cada fotón, y con ello la energía de cada electrón expulsado, en acuerdo preciso con los datos. Las propiedades tipo partícula de los fotones fueron finalmente confirmadas por Arthur Compton en 1923 mediante experimentos que implican la dispersión elástica de fotones y electrones. **<<**

[4.8] Institut International de Physique Solvay, Rapport et discussions du 5éme Conseil (París, 1928), pp. 253ss. **<<**

[4.9] Irene Bom, trans., The Bom-Einstein Letters (Nueva York, Walker, 1971), p. 223. [Hay trad. cast.: Correspondencia (1916-1955), Siglo XXI, México, 1971.] **<<**

[4.10] Henry Stapp, Nuovo Cimento 40B (1977), pp. 191-204.
<<

[4.11] David Bohm fue una de las mentes creativas que trabajaron en mecánica cuántica durante el siglo xx. Nació en Pensilvania en 1917 y fue estudiante de Oppenheimer en Berkeley. Mientras enseñaba en la Universidad de Princeton fue llamado a comparecer ante el Comité de Actividades AntiAmericanas, pero se negó a testificar en las audiencias. Fue expulsado de Estados Unidos y se convirtió en profesor en la Universidad de Sao Paulo en Brasil, luego en el Technion en Israel, y finalmente en el Birbeck College de la Universidad de Londres. Vivió en Londres hasta su muerte en 1992. **<<**

[4.12] Por supuesto, si usted espera lo suficiente, lo que usted le hace a una partícula puede, en principio, afectar a la otra: una partícula podría enviar una señal que alerte a la otra de que ha sido sometida a una medida, y esta señal podría afectar a la partícula receptora. Sin embargo, puesto que ninguna señal puede viajar a mayor velocidad que la de la luz, este tipo de influencia no es instantánea. El punto clave en la discusión actual es que en el mismo momento en que medimos el espín de una partícula en tomo a un eje escogido conocemos el espín de la otra partícula sobre dicho eje. Y así, cualquier tipo de comunicación «estándar» entre las partículas —comunicación lumínica o sublumínica — no es relevante. **<<**

[4.13] En esta sección y en la próxima, la depuración del descubrimiento de Bell que estoy utilizando es una «dramatización» inspirada por los maravillosos artículos de David Mermin «Quantum Misteries for Anyone», Journal of Philosophy, 78 (1981), pp. 397-408; «Can you Help Your Time Tonight by Watching on TV?», en Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell 's Theoreme, James T. Cushing and Ernán Mac Mullin, eds. (University of Notre Dame, 1989; «Spoky Action at a Distance: Mysteries of the Quantum Theory», en The Great Ideas Today (Ency-clopaedia Britannica, Inc., 1988) que están también recogidos en N. David Mermin Boojums All the Way Through (Cambridge, Cambridge University Press, 1990). Para cualquiera interesado en seguir estas ideas de una manera más técnica, no hay mejor lugar para empezar que los artículos del propio Bell, muchos de los cuales están reunidos en J. S. Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics (Cambridge, Cambridge University Press, 1997). **<<**

[4.14] Aunque la hipótesis de localidad es fundamental para el argumento de Einstein, Podolski y Rosen, los investigadores han tratado de encontrar fallos en otros elementos de su razonamiento en un intento de evitar la conclusión de que el universo admite características no locales. Por ejemplo, se afirma a veces que todo lo que los datos requieren es que abandonemos el denominado realismo —la idea de que los objetos poseen las propiedades que se les mide independientemente del proceso de medida—. En este contexto, no obstante, esta afirmación yerra el punto esencial. Si el razonamiento EPR hubiera sido confirmado por el experimento, no habría nada misterioso en las correlaciones a larga distancia de la mecánica cuántica; no habrían sido más sorprendentes que las correlaciones a larga distancia clásicas, tales como que su hallazgo del guante izquierdo aquí asegura que su compañero hallará allí un guante derecho. Pero tal razonamiento queda refutado por los resultados de Bell/Aspect. Ahora bien, si en respuesta a esta refutación de EPR abandonamos el realismo —como hacemos en la mecánica cuántica estándar— eso no debilita en nada la contundente extrañeza de las correlaciones a larga distancia entre procesos aleatorios ampliamente separados; cuando renunciamos al realismo, los guantes, como en la nota final 4, se hacen «guantes cuánticos». Abandonar el realismo no hace de ningún modo menos extrañas las correlaciones no locales observadas. Es cierto que si a la luz de los resultados de EPR, Bell y Aspect tratamos de mantener el realismo —por ejemplo, como en la teoría de Bohm discutida más adelante en el capítulo— el tipo de no localidad que necesitamos para ser consistentes con los

datos parece ser más severo, incluyendo interacciones no locales, y no sólo correlaciones no locales. Muchos físicos se han negado a esta opción y han abandonado el realismo. **<<**

[4.15] Ver, por ejemplo, Murray Gellmann, The Quark and the Jaguar (Nueva York, Freeman, 1994), y Huw Price, Time’s Arrow and Archimedes’ Point (Oxford, Oxford University Press, 1996) **<<**

[4.16] La relatividad especial prohíbe que algo que ha viajado alguna vez más lento que la luz cruce la barrera de la velocidad de la luz. Pero que algo haya estado viajando siempre más rápido que la velocidad de la luz no está estrictamente descartado por la relatividad especial. Partículas hipotéticas de este tipo se denominan taquiones. La mayoría de los físicos creen que los ta-quiones no existen, pero otros disfrutan jugando con la posibilidad de que lo hagan. Hasta ahora, sin embargo, fundamentalmente debido a las características extrañas que tendrían esas partículas más rápidas que la luz según las ecuaciones de la relatividad general, nadie ha encontrado ningún uso particular para ellas —ni siquiera hablando hipotéticamente —. En estudios modernos, se considera generalmente que una teoría que dé lugar a taquiones adolece de inestabilidad. **<<**

[4.17] El lector con inclinación matemática debería advertir que, en su núcleo, la relatividad especial afirma que las leyes de la física deben ser invariantes Lorentz, es decir, invariantes bajo transformaciones de coordenadas en el espaciotiempo de Minkowski. La conclusión, entonces, es que la mecánica cuántica encajaría con la relatividad especial si pudiera ser formulada de una manera totalmente invariante Lorentz. Ahora bien, la mecánica cuántica relativista y la teoría cuántica de campos relativista han recorrido un largo camino hacia ese objetivo, pero aún no hay un pleno acuerdo respecto a si han abordado el problema de la medida cuántica en un marco invariante Lorentz. En la teoría cuántica relativista, por ejemplo, es sencillo calcular, de una manera completamente invariante Lorentz, las amplitudes de probabilidad y las probabilidades para los resultados de varios experimentos. Pero el tratamiento estándar queda lejos de describir también la forma en que emerge un resultado particular u otro del abanico de posibilidades cuánticas —es decir, qué sucede en el proceso de medida—. Esta es una cuestión particularmente importante para el entrelazamiento, pues el fenómeno depende en efecto de lo que hace un experimentador —el acto de medir una de las propiedades de la partícula entrelazada—. Para una discusión más detallada, ver Tim Maudlin, Quantum Non-locality and Relativity (Oxford, Blackwell, 2002). **<<**

[4.18] Para el lector con inclinación matemática he aquí el cálculo meca-nocuántico que hace predicciones en acuerdo con estos experimentos. Suponga que los ejes a lo largo de los cuales los detectores miden el espín son un eje vertical y otros dos a 120 grados en el sentido de las agujas y en sentido contrario respecto a la vertical (como las doce en punto, las cuatro en punto y las ocho en punto en dos relojes, uno por cada detector, que están uno enfrente de otro) y considere, por razón del argumento, dos electrones que salen espalda contra espalda y se dirigen hacia estos detectores en el denominado estado singlete. Éste es el estado cuyo espín total es cero, lo que asegura que si se encuentra que un electrón está en el estado espín-arriba, el otro estará en el estado espín-abajo, en tomo a un eje dado, y viceversa. (Recordemos que, para simplificar, en el texto he descrito las correlaciones entre los electrones como si asegurasen que si uno está en espín-arriba también lo está el otro, y si uno está espín-abajo, también lo está el otro; en realidad, la correlación es tal que los espines apuntan en direcciones opuestas. Para enlazar con el texto principal, usted siempre puede imaginar que los dos detectores están calibrados de forma opuesta, de modo que lo que uno llama espín-arriba el otro llama espín-abajo.) Un resultado estándar de la mecánica cuántica elemental demuestra que si el ángulo entre los ejes a lo largo de los cuales nuestros dos detectores miden los espines de los electrones es q, entonces la probabilidad de que midan valores de espín opuestos es eos2 (q/2). Así, si los ejes de los detectores están alineados (q = 0), decididamente miden valores de espín opuestos. (El análogo a que los detectores en el test principal midan siempre el mismo valor cuando se fijan en la

misma dirección), y si se fijan a o bien +120° o bien -120°, la probabilidad de que midan espines opuestos es eos2(+120° o -120°) = 1/4. Ahora, si los ejes de los detectores se fijan aleatoriamente, 1/3 de las veces apuntarán en la misma dirección, y 2/3 de las veces no lo harán. Así, en todas las realizaciones, esperamos encontrar espines opuestos (l/3)(l)+(2/3)(l/4) = 1/2 de las veces, como se encuentra en los datos. Quizá usted encuentre extraño que la hipótesis de localidad dé una correlación de espín más alta (mayor que el cincuenta por 100) que la que encontramos con la mecánica cuántica estándar (exactamente el cincuenta por 100); usted pensaría que el entrelazamiento a larga distancia de la mecánica cuántica debería dar una correlación mayor.

De hecho, lo hace. Una manera de verlo es ésta: con sólo una correlación del cincuenta por 100 sobre todas las medidas, las mecánica cuántica da una correlación del cien por 100 para medidas en las que los ejes de los detectores izquierdo y derecho se escogen apuntando en la misma dirección. En el universo local de Einstein, Podolski y Rosen, se requiere una correlación mayor del 55 por 100 sobre todas las medidas para asegurar un cien por 100 de acuerdo cuando se escogen los mismos ejes. Entonces, de forma aproximada, en un universo local una correlación de un cincuenta por 100 sobre todas las medidas implicaría una correlación de menos del cien por 100 cuando se escogen los mismos ejes —por ejemplo, una correlación menor que la que encontramos en nuestro universo cuántico no-local. **<<**

[4.19] Usted podría pensar que un colapso instantáneo superaría la velocidad límite fijada por la luz y por ello aseguraría un conflicto con la relatividad especial. Y si las ondas de probabilidad fuesen realmente como las ondas de agua, usted habría tenido una prueba irrefutable. Que el valor de una onda de probabilidad cayese repentinamente a cero en una enorme extensión sería mucho más sorprendente que si toda el agua del Océano Pacífico se hiciera instantáneamente plana y dejara de moverse. Pero, dicen los que utilizan la mecánica cuántica, las ondas de probabilidad no son como las ondas de agua. Una onda de probabilidad, aunque describe la materia, no es en sí misma algo material y, siguen diciendo los practicantes, la barrera de la velocidad de la luz se aplica sólo a objetos materiales, cosas cuyo movimiento puede verse, sentirse y detectarse directamente. Si una onda de probabilidad de un electrón ha caído a cero en la Galaxia Andrómeda, un físico de Andrómeda sencillamente fracasaría, con un cien por 100 de certeza, en detectar el electrón. Nada en las observaciones del físico de Andrómeda revela el cambio repentino en la onda de probabilidad asociado con la detección acertada, digamos, del electrón en Nueva York. En tanto que el propio electrón no viaja de un lugar a otro a velocidad mayor que la luz, no hay conflicto con la relatividad especial. Y, como usted puede ver, todo lo que ha sucedido es que el electrón fue encontrado en Nueva York y no en ningún otro lugar. Su velocidad nunca entró en la discusión. Así, aunque el colapso instantáneo de la probabilidad es un marco que trae enigmas y problemas (discutidos con más detalle en el capítulo 7), no implica necesariamente un conflicto con la relatividad especial. **<<**

[4.20] Para una discusión de algunas de estas propuestas, ver Tim Maudlin, Quantum Non—locality and Reality. **<<**

Capítulo 5

[5.1]

Para el lector con inclinación matemática, a partir de la ecuación $t_{movimiento} = \gamma(t_{reposo} - (v/c^2)x_{reposo})$ (discutida en la nota 9 del capítulo 3) encontramos que la lista-ahora de Chewie en un instante dado contendrá sucesos que los observadores en la Tierra afirmarán que sucedieron $(v/c^2)x_{Tierra}$ antes, donde x_{Tierra} es la distancia de Chewie a la Tierra. Esto supone que Chewie se está alejando de la Tierra. En el caso del movimiento hacia la Tierra, v tiene el signo opuesto, de modo que los observadores en la Tierra afirmarán que tales sucesos sucedieron $(v/c^2)x_{Tierra}$ más tarde. Haciendo v = 15 kilómetros por hora y $x_{Tierra} = 10^{10}$ años-luz, encontramos que $(v/c^2)x_{Tierra}$ es aproximadamente 150 años.

<<

[5.2] Este número —y un número similar dado algunos párrafos después para describir el movimiento de Chewie hacia la Tierra— eran válidos en el momento de la publicación del libro. Pero a medida que pasa el tiempo en la Tierra, se harán ligeramente inadecuados. **<<**

[5.3] El lector con inclinación matemática debería advertir que la metáfora de rebanar la barra del espaciotiempo a ángulos diferentes es el concepto usual de diagrama espaciotemporal que se enseña en los cursos de relatividad especial. En los diagramas espaciotemporales, las tres dimensiones espaciales en un instante dado de tiempo, según un observador que se considera en reposo, se denotan por una línea horizontal (o, en diagramas más elaborados, por un plano horizontal), mientras que el tiempo se denota por el eje vertical. (En nuestra representación, cada «rebanada de pan» —un plano— representa todo el espacio en un instante de tiempo, mientras que el eje que recorre el centro de la barra, de corteza a corteza, es el eje temporal.) Los diagramas espaciotemporales proporcionan una manera intuitiva de ilustrar el punto a tener en cuenta acerca de las rebanadas ahora de usted y Chewie. **<<**

[5.4] El lector experto reconocerá que estoy suponiendo que el espacio-tiempo es núnkowskiano. Un argumento similar en otras geometrías no dará necesariamente el espaciotiempo entero. **<<**

[5.5] Albert Einstein and Michele Besso: Correspondence 1903-1955, P. Speziali, ed. (París, Hermán, 1972) [Hay trad. cast.: Correspondencia con Michele Besso, Tusquets, Barcelona, 1994.] **<<**

[5.6] La discusión aquí pretende dar una idea cualitativa de cómo una experiencia precisamente ahora, junto los recuerdos que usted tiene precisamente ahora, forman la base de su sensación de haber experimentado una vida en la que ha vivido dichos recuerdos. Pero si, por ejemplo, su cerebro y su cuerpo fueran colocados exactamente en el mismo estado en que están precisamente ahora, usted tendría la misma sensación de haber vivido la vida que sus recuerdos testimonian (suponiendo, como yo lo hago, que la base de toda experiencia puede encontrarse en el estado físico del cerebro y el cuerpo), incluso si dichas experiencias nunca sucedieron realmente sino que fueron impresas artificialmente en su estado cerebral. Una simplificación en la discusión es la hipótesis de que podemos sentir o experimentar cosas que suceden en un único instante cuando, en realidad, se necesita un tiempo de procesamiento para que el cerebro reconozca e interprete cualquier estímulo que reciba. Aunque cierto, esto no es de especial relevancia para lo que estoy señalando; es una complicación interesante pero básicamente irrelevante que surge de analizar el tiempo de una manera directamente ligada a la experiencia humana. Como discutimos antes, los ejemplos humanos ayudan a hacer nuestra discusión más visceral, pero requieren que prescindamos de aquellos aspectos de la discusión que son más interesantes desde una perspectiva biológica frente a una perspectiva física. **<<**

[5.7] Usted podría preguntarse qué relación tiene la discusión en este capítulo con nuestra descripción en el capítulo 3 de objetos que se mueven a través del espaciotiempo a la velocidad de la luz. Para el lector sin inclinación matemática, la respuesta aproximada es que la historia de un objeto está representada por una curva en el espaciotiempo —una trayectoria a través de la barra del espaciotiempo que resalta cada lugar en el que ha estado el objeto en el instante en que estaba allí (como vemos en la figura 5.1)—. La noción intuitiva de moverse a través del espaciotiempo puede expresarse entonces en un lenguaje «sin flujo» especificando simplemente esta parte (frente a imaginar la trayectoria trazada ante sus ojos). La «velocidad» asociada con esta trayectoria es entonces una medida de la longitud del camino (desde un punto escogido a otro), dividida por la diferencia de tiempos registrada en un reloj llevado por alguien o algo entre los dos puntos escogidos en la trayectoria. Esto, una vez más, es una concepción que no implica ningún flujo de tiempo: usted simplemente mira lo que dice el reloj en cuestión en los dos puntos de interés. Resulta que la velocidad que se encuentra de esta forma, para cualquier movimiento, es igual a la velocidad de la luz. El lector con inclinación matemática se dará cuenta de que la razón para ello es inmediata. En el espaciotiempo de Minkowski la métrica es ds2 = c dt2 - dx2 (donde dx2 es la longitud euclidea dx,2 + dx22 + dx32), mientras que el tiempo llevado por un reloj (tiempo «propio») viene dado por dt2 = ds2/c2. Así, evidentemente, la velocidad a través del espaciotiempo recién definida está dada matemáticamente por ds/dt, que es igual a c. **<<**

[5.8] Rudolf Carnap, «Autobiography», en The Philosophy of Rudolf Carnap, P. A. Schilpp, ed. (Chicago Library of Living Philosophers, 1963), p. 37. **<<**

Capítulo 6

[6.1] Note que la asimetría a la que nos referimos —la flecha del tiempo— surge del orden en el que los sucesos tienen lugar en el tiempo. Usted también podría preguntarse sobre simetrías en el propio tiempo —-por ejemplo, como veremos en capítulos posteriores, según algunas teorías cosmológicas el tiempo puede haber tenido un comienzo pero puede no tener un fin—. Son nociones distintas de asimetría temporal, y nuestra discusión aquí se centra en la primera. Incluso así, al final de este capítulo llegaremos a la conclusión de que la asimetría temporal de las cosas en el tiempo se basa en condiciones especiales en el principio de la historia del universo, y así vinculan la flecha del tiempo con aspectos de la cosmología. **<<**

[6.2] Para el lector con inclinación matemática, déjeme señalar más exactamente lo que se entiende por simetría de inversión temporal y apuntar una excepción intrigante cuya importancia para las cuestiones que estamos discutiendo en este capítulo todavía no ha sido completamente establecida. La noción más simple de simetría de inversión temporal es la afirmación de que un conjunto de leyes de la física es simétrico frente a inversión temporal si

dada una solución cualquiera de las ecuaciones, digamos $S(t)$, entonces $S(-t)$ es también una solución de las ecuaciones. Por ejemplo, en mecánica newtoniana, con fuerzas que dependen de las posiciones de las partículas, si $\boldsymbol{x}(t) = (x_1(t), x_2(t),..., x_{3n}(t))$ son las posiciones de n partículas en tres dimensiones espaciales, entonces el hecho de que $\boldsymbol{x}(t)$ es solución de $d^2\boldsymbol{x}(t)/dt^2 = F(\boldsymbol{x}(t))$ implica que $\boldsymbol{x}(-t)$ es también una solución de las ecuaciones de Newton, i.e., $d^2\boldsymbol{x}(-t)/dt^2 = F(\boldsymbol{x}(-t))$. Nótese que $\boldsymbol{x}(-t)$ representa el movimiento de una partícula que pasa por las misma posiciones que $\boldsymbol{x}(t)$, pero en orden invertido, con velocidades invertidas.

Con más generalidad, un conjunto de leyes físicas nos proporciona un algoritmo para hacer evolucionar un estado inicial de un sistema físico en un instante t_0 hasta otro instante $t + t_0$. En concreto, este algoritmo puede verse como una aplicación $U(t)$ que toma una entrada $S(t_0)$ y produce $S(t + t_0)$, es decir: $S(t + t_0) = U(t)S(t_0)$. Decimos que las leyes que dan lugar a $U(t)$ son simétricas frente a inversión temporal si existe una aplicación T que satisface

dada una solución cualquiera de las ecuaciones, digamos S(t), entonces S(-t) es también una solución de las ecuaciones. Por ejemplo, en mecánica newtoniana, con fuerzas que dependen de las posiciones de las partículas, si x(t) = (xdt), x2(t),..., x3n(t)) son las posiciones de n partículas en tres dimensiones espaciales, entonces el hecho de que x(t) es solución de d2x(t)/dt2 = F(x(t)) implica que x(-t) es también una solución de las ecuaciones de Newton, i.e., d2x(-t)/dt2 = F(x(-t)). Nótese que x(-t)

representa el movimiento de una partícula que pasa por las misma posiciones que $x(t)$, pero en orden invertido, con velocidades invertidas. **<<**

[6.3] A veces encuentro que hay resistencia a aceptar la afirmación teórica de que los trozos de la cáscara de huevo se unirían de nuevo realmente para dar una cáscara intacta y prístina. Pero la simetría de inversión temporal de las leyes de la Naturaleza, tal como se ha desarrollado con mayor precisión en la nota anterior, asegura que esto es lo que sucedería. Microscópicamente, la rotura de un huevo es un proceso físico que implica a las diversas moléculas que constituyen la cáscara. Si aparecen grietas y se rompe la cáscara es porque el impacto que sufre el huevo obliga a grupos de moléculas a separarse. Si estos movimientos moleculares tuvieran lugar al revés, las moléculas se juntarían de nuevo, recomponiendo la cáscara en su forma anterior. **<<**

[6.4] Para seguir centrados en las formas modernas de considerar estas ideas, estoy saltándome una historia muy interesante. El propio pensamiento de Boltzmann sobre el tema de la entropía sufrió refinamientos importantes durante las décadas de 1870 y 1880 del siglo xix, cuando interacciones y comunicaciones con físicos tales como James Clerk Maxwell, Lord Kelvin, Jo-sef Loschmidt, Josiah Willard Gibbs, Henri Poincaré, S. H. Burbury y Emst Zermelo fueron instrumentales. De hecho, Boltzmann pensaba inicialmente que podía demostrar que la entropía sería siempre y absolutamente no decreciente para un sistema físico aislado, y no que fuera altamente poco probable que tuviese lugar tal reducción de entropía. Pero objeciones planteadas posteriormente por estos y otros físicos llevaron a Boltzmann a resaltar la aproximación estadística/probabilista al tema, la aproximación que se sigue utilizando hoy. **<<**

[6.5] Estoy imaginando que utilizamos la edición de Guerra y Paz de la Modem Library Classics con 1.386 páginas de texto. **<<**

[6.6] El lector con inclinación matemática debería advertir que puesto que los números pueden hacerse tan grandes, la entropía se define realmente como el logaritmo del número de configuraciones posibles, un detalle que no nos preocupará aquí. Sin embargo, como cuestión de principio esto es importante porque es muy conveniente que la entropía sea una magnitud extensiva, lo que significa que si usted junta dos sistemas, la entropía de su unión es la suma de sus entropías individuales. Esto es cierto solamente para la forma logarítmica de la entropía, porque el número de configuraciones en dicha situación está dado por el producto de las configuraciones individuales, de modo que el logaritmo del número de configuraciones es aditivo. **<<**

[6.7] Aunque, en principio, podemos predecir dónde caerá cada página, quizá a usted le preocupe que exista un elemento adicional que determina el ordenamiento de las páginas: cómo las recoge usted y hace con ellas un montón. Esto no es relevante para la física que se está discutiendo, pero, en caso de que le moleste, imagine que nos ponemos de acuerdo en que usted irá cogiendo las páginas, una a una, empezando con la que tenga más cerca, y luego cogiendo la página más próxima a ésta, y así sucesivamente. (Y, por ejemplo, podemos estar de acuerdo en medir distancias desde la esquina más próxima a la página en cuestión.) **<<**

[6.8] La idea de calcular el movimiento de siquiera unas pocas páginas con la precisión requerida para predecir su ordenamiento (después de utilizar algún algoritmo para apilarlas en un montón, tal como en la nota anterior) es en realidad extraordinariamente optimista. Dependiendo de la flexibilidad y peso del papel, dicho cálculo relativamente «simple» podría seguir estando más allá de la potencia computacional de hoy. **<<**

[6.9] Podría preocuparle el hecho de que existe una diferencia fundamental entre definir una noción de entropía para el ordenamiento de páginas y definir una para un conjunto de moléculas. Después de todo, los ordenamientos de páginas son discretos —usted puede contarlos, uno a uno, y así, aunque el número total de posibilidades puede ser grande, es en cualquier caso finito—. Por el contrario, el movimiento y la posición de cada molécula individual son continuos —usted no puede contarlos uno a uno, y por eso hay (al menos según la física clásica) un número infinito de posibilidades. Así que ¿cómo puede hacerse un recuento preciso de re-ordenamientos moleculares? Bien, la respuesta breve es que ésta es una buena pregunta, pero una que ya ha sido respondida plenamente —de modo que si eso basta para aliviar su preocupación, siéntase libre para saltarse lo que sigue—. La respuesta más larga requiere un poco de matemáticas, de modo que sin una formación puede ser duro seguirla por completo. Los físicos describen un sistema clásico de muchas partículas apelando a un espacio de fases, un espacio de 6N dimensiones (donde N es el número de partículas) en el que cada punto denota todas las posiciones y velocidades de las partículas (cada posición requiere tres números, como lo hace cada velocidad, lo que explica la 6N dimensionalidad del espacio de fases). El punto esencial es que ese espacio de fases puede dividirse en regiones tales que todos los puntos en una región dada corresponden a configuraciones de las posiciones y velocidades de las moléculas que tienen una misma apariencia y características globales. Si la configuración de las moléculas se cambiara de un punto en una región dada del espacio de fases a otro punto en la

misma región, una estimación macroscópica encontraría las dos configuraciones indistinguibles. Ahora, en lugar de contar el número de puntos en una región dada —el análogo más directo a contar el número de diferentes reordenamientos de páginas, pero algo que ciertamente daría como resultado una respuesta infinita— los físicos definen la entropía en términos del volumen de cada región en el espacio de fases. Un volumen mayor significa más puntos y con ello una mayor entropía. Y el volumen de una región, incluso una región en un espacio de dimensiones más altas, es algo a lo que puede darse una definición matemática rigurosa. (Matemáticamente requiere escoger algo llamado una medida y, para el lector con inclinación matemática, señalaré que normalmente escogemos la medida que es uniforme sobre todos los microestados compatibles con un macroestado dado —es decir, cada configuración microscópica asociada con un conjunto dado de propiedades macroscópicas se supone igualmente probable—.) **<<**

[6.10] Específicamente, sabemos una forma en la que esto podía suceder: si unos pocos días antes el CO2 estaba inicialmente en la botella, entonces sabemos de nuestra discusión anterior que si, precisamente ahora, usted invirtiese simultáneamente las velocidades de todas y cada una de las moléculas de CO2, y de cada molécula y átomo que ha interaccionado con las moléculas de CO2, y espera los mismos días, todas las moléculas se agruparían de nuevo en la botella. Pero esta inversión de velocidades no es algo que pueda conseguirse en la práctica, ni mucho menos algo que sea probable que suceda por sí mismo. No obstante, yo podría señalar que se puede demostrar matemáticamente que si usted espera el tiempo suficiente, todas las moléculas de CO2, por sí mismas, encontrarán su camino de vuelta a la botella. Un resultado demostrado en el siglo xix por el matemático francés Joseph Liouvi-lle puede utilizarse para establecer lo que se conoce como el teorema de recurrencia de Poincaré. Este teorema demuestra que, si usted espera el tiempo suficiente, un sistema con una energía finita y confinado a un volumen espacial finito (como las moléculas de CO2 en una habitación cerrada) volverá a un estado arbitrariamente próximo a su estado inicial (en este caso, todas las moléculas de CO2 situadas dentro de la botella). La cuestión es cuánto tiempo tendrá usted que esperar para que esto suceda. Para sistemas con un número elevado de constituyentes, el teorema demuestra que usted tendría que esperar mucho más que la edad del universo para que los constituyentes se reagruparan por sí mismos en su configuración inicial. No obstante, como cuestión de principio, es provocativo señalar que con paciencia y

longevidad sin límites cada sistema físico limitado espacialmente volverá a su configuración inicial. **<<**

[6.11] Usted podría preguntarse por qué el agua nunca se convierte en hielo, puesto que eso da como resultado que las moléculas de H2O se hagan más ordenadas, es decir, alcancen una entropía menor, y no mayor. Bien, la respuesta aproximada es que cuando el agua líquida se convierte en hielo sólido, cede energía al ambiente (lo contrario de lo que sucede cuando el hielo se funde, en que toma energía del ambiente), y eso eleva la entropía del ambiente. A temperaturas ambiente suficientemente bajas, es decir, por debajo de cero grados Celsius, el aumento de la entropía del ambiente supera la disminución en la entropía del agua, de modo que la congelación se hace entrópicamente favorecida. Por esto es por lo que se forma hielo en el frío del invierno. Análogamente, cuando se forman cubos de hielo en su refrigerador, su entropía baja pero el propio refrigerador bombea calor al ambiente, y si éste se tiene en cuenta, hay un incremento neto de entropía total. La respuesta más precisa, para el lector con inclinación matemática, es que los fenómenos espontáneos del tipo que estamos discutiendo están gobernados por lo que se conoce como energía libre. Intuitivamente, la energía libre es esa parte de la energía de un sistema que puede ser aprovechada para hacer algún trabajo. Matemáticamente, la energía libre, F, se define por F = U - TS, donde U representa la energía total, T representa la temperatura y S representa la entropía. Un sistema sufrirá un cambio espontáneo si eso da como resultado una disminución de su energía libre. A bajas temperaturas, la caída en U asociada con que el agua líquida se transforme en hielo sólido supera a la dis-minuicón en S (supera al aumento en -TS), y por ello ocurrirá. A altas temperaturas (por encima de cero grados

Celsius), no obstante, el cambio de hielo a agua líquida o vapor gaseoso está entrópicamente favorecido (el aumento en S supera los cambios en U) y así ocurrirá. **<<**

[6.12] Para una discusión inicial de cómo una simple aplicación del razonamiento entrópico nos llevaría a concluir que los recuerdos y los registros históricos no son exposiciones del pasado dignas de confianza, ver C. F. von Weizsácker en The Unit ofNature (Nueva York, Farrar, Straus and Giroux, 1980), pp. 138-146 (originalmente publicado en Annalen del Physik 36, 1939). Para una excelente discusión reciente, ver David Albrecht Time and Chance (Cambridge, Mass., Harvard University Press, 2000). **<<**

[6.13] De hecho, puesto que las leyes de la física no distinguen entre hacia adelante y hacia atrás en el tiempo, la explicación de tener cubos de hielo totalmente formados media hora antes, a las 22.00, sería exactamente igual de absurda —hablando entrópicamente— que predecir que media hora más tarde, a las 23:00, los pequeños trozos de hielo habrían crecido hasta cubos de hielo totalmente formados. Por el contrario, la explicación de tener agua líquida a las 22.00, que lentamente forma pequeños trozos de hielo a las 22.30, es exactamente igual de razonable que predecir que a las 23.00 los pequeños trozos de hielo se fundirán en agua líquida, algo que es familiar y totalmente esperado. Esta última explicación, desde la perspectiva de la observación a las 22.30, es perfectamente simétrica con respecto al tiempo y, además, coincide con nuestras observaciones posteriores. **<<**

[6.14] El lector especialmente cuidadoso podría pensar que he prejuzgado la discusión con la expresión «al principio» puesto que introduce una asimetría temporal. Lo que quiero decir, en lenguaje más preciso, es que no necesitaremos condiciones especiales que prevalezcan en (al menos) un extremo de la dimensión temporal. Como se hará claro, las condiciones especiales equivalen a una condición de contorno de baja entropía y llamaré el «pasado» a una dirección en la que se satisface esta condición. **<<**

[6.15] La idea de que la flecha del tiempo requiere un pasado de baja entropía tiene una larga histroia que se remonta a Boltzmann y otros; fue discutida en detalle en Hans Reichenbach, The Direction of Time (Mineóla, Nueva York, Dover Publications, 1984) y fue defendida de una manera cuantitativa particularmente interesante en Roger Penrose, The Emperor’s New Mind (Nueva York, Oxford University Press, 1989), pp. 317 ss. **<<**

[6.16] Recordemos que nuestra discusión en este capítulo no tiene en cuenta la mecánica cuántica. Como demostró Stephen Hawking en la década de 1970, cuando se consideran efectos cuánticos los agujeros negros permiten que se fugue cierta cantidad de radiación, pero esto no afecta a que sean los objetos en el cosmos de máxima entropía. **<<**

[6.17] Una pregunta natural es cómo sabemos que no hay alguna ligadura futura que tenga también un impacto en la entropía. La conclusión es que no lo sabemos, y algunos físicos han sugerido incluso experimentos para detectar la posible influencia que tal ligadura futura pudiera tener sobre las cosas que podemos observar hoy. Para un artículo interesante que discute la posibilidad de ligaduras pasadas y futuras sobre la entropía ver Murray Gell-Mann y James Hartle, «Time Symmetry and Asymmetry in Quantum Mechanics and Quantum Cosmology», en Physical Origins ofTime Asymmetry, J.J. Halliwell, J. Pérez-Mercader, W.H. Zurek, eds. (Cambridge, Cambridge University Press, 1996), así como otros artículos en las partes 4 y 5 de esta recopilación. **<<**

[6.18] En este capítulo hemos hablado de la flecha del tiempo haciendo referencia al hecho aparente de que hay una asimetría a lo largo del eje temporal (eje temporal de cualquier observador) del espaciotiempo: una enorme variedad de secuencia de sucesos está dispuesta en un orden a lo largo del eje temporal, pero el ordenamiento inverso de tales sucesos apenas ocurre, si es que lo hace alguna vez. Durante años, físicos y filósofos han dividido estas secuencias de sucesos en subcategorías cuyas asimetría temporales podrían estar sujetas, en teoría, a explicaciones lógicamente independientes. Por ejemplo, el calor fluye de objetos calientes a otros más fríos, pero no de objetos fríos a los calientes; las ondas electromagnéticas emanan de fuentes como estrellas y bombillas, pero nunca parecen converger en tales fuentes; el universo parece estar expandiéndose uniformemente, y no contrayéndose; y nosotros recordamos el pasado y no el futuro (éstas son las denominadas flecha del tiempo termondinámica, electromagnética, cosmológica y psicológica, respectivamente). Todos estos son fenómenos asimétricos en el tiempo, pero en principio podrían adquirir su asimetría temporal a partir de principios físicos completamente diferentes. Mi opinión, una que muchos comparten (pero otros no), es que, excepto posiblemente la flecha cosmológica, estos fenómenos temporalmente asimétricos no son fundamentalmente diferentes y, en última instancia, están sujetos a la misma explicación —la que hemos descrito en este capítulo—. Por ejemplo, ¿por qué la radiación electromagnética viaja en ondas que se expanden hacia afuera pero no en ondas que se contraen hacia adentro, incluso si ambas son soluciones perfectamente

buenas de las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell? Bien, porque nuestro universo tiene fuentes ordenadas, coherentes, de baja entropía para tales ondas hacia afuera —estrellas y bombillas por citar dos— y la existencia de estas fuentes ordenadas deriva del entorno aún más ordenado en el nacimiento del universo, como se discute en el texto principal. La flecha del tiempo psicológica es más difícil de abordar puesto que hay mucho sobre la base microfísica del pensamiento humano que aún tenemos que entender. Pero se han hecho muchos progresos en entender la flecha del tiempo cuando se trata de computadores —emprender, completar y luego producir un registro de una computación es una secuencia computacional básica cuyas propiedades entrópicas son bien entendidas (como desarrollaron Charles Benett, Rolf Landauer y otros), y ajustan perfectamente dentro de la segunda ley de la termodinámica—. Así, si el pensamiento humano puede asemejarse a procesos computacionales, puede aplicarse una explicación termodinámica similar. Nótese también que la asimetría asociada con el hecho de que el universo se está expandiendo y no contrayendo está relacionada, aunque es lógicamente distinta, con la flecha del tiempo que hemos estado explorando. Si la expansión del universo se frenara, detuviera y luego se convirtiera en una contracción, la flecha del tiempo seguiría apuntando en la misma dirección. Los procesos físicos (huevos que se rompen, personas que envejecen y demás) seguirían sucediendo en la dirección habitual, incluso si la expansión del universo se hubiera invertido. **<<**

[6.19] Para el lector con inclinación matemática, note que cuando hacemos este tipo de afirmación probabilista estamos suponiendo una medida de probabilidad concreta: la que es uniforme sobre todos los microestados compatibles con lo que vemos precisamente ahora. Hay, por supuesto, otras medidas a las que podríamos apelar. Por ejemplo, David Albert en Time and Chance ha defendido la utilización de una medida de probabilidad que es uniforme sobre todos los microestados compatibles con lo que vemos ahora y que él llama la hipótesis del pasado —el hecho aparente de que el universo empezó en un estado de baja entropía—. Utilizando esta medida, eliminamos la consideración de todas las historias salvo las que son compatibles con el pasado de baja entropía atestiguado por nuestros recuerdos, registros y teorías cosmológicas. En esta manera de pensar, no hay interrogante proba-bilístico sobre un universo con baja entropía; empezó así, por hipótesis, con probabilidad 1. Sigue existiendo el mismo enorme interrogante de por qué empezó así, incluso si no se expresa en un contexto probabilista. **<<**

[6.20] Quizá usted esté tentado a argumentar que el universo conocido tenía baja entropía al principio simplemente porque era mucho más pequeño en tamaño de lo que es hoy, y por eso —como un libro con menos páginas— permitía muchas menos organizaciones de sus constituyentes. Pero por sí solo esto no sirve. Incluso un universo pequeño puede tener una enorme entropía. Por ejemplo, un destino posible (aunque poco probable) para nuestro universo es que la expansión actual se detenga un día, se invierta y el universo implosione, terminando en el denominado big crunch. Los cálculos muestran que si incluso el tamaño del universo decreciera durante la fase de implosión, la entropía seguiría aumentando, lo que demuestra que tamaño pequeño no asegura baja entropía. En el capítulo 11, sin embargo, veremos que el pequeño tamaño inicial del universo desempeña un papel en nuestra mejor explicación actual del comienzo con baja entropía. **<<**

Capítulo 7

[7.1] Es bien sabido que las ecuaciones de la física clásica no pueden resolverse exactamente si se está estudiando el movimiento de tres o más cuerpos en interacción mutua. Así, incluso en física clásica, cualquier predicción real sobre el movimiento de un gran conjunto de partículas será necesariamente aproximada. El punto importante, no obstante, es que no hay ningún límite fundamental a lo buena que pueda ser esta aproximación. Si el mundo estuviera gobernado por la física clásica, entonces con computadores cada vez más potentes y datos iniciales cada vez más precisos de las posiciones y velocidades, podríamos acercamos cada vez más a la respuesta exacta. **<<**

[7.2] Al final del capítulo 4 señalé que los resultados de Bell, Aspect y otros no descartan la posibilidad de que las partículas tengan siempre posiciones y velocidades definidas, incluso si no se pueden determinar tales características simultáneamente. Además, la versión de Bohm de la mecánica cuántica realiza explícitamente esta posibilidad. Así, aunque la idea ampliamente sostenida de que un electrón no tiene una posición hasta que sea medida es una característica estándar de la aproximación convencional a la mecánica cuántica, es, estrictamente hablando, demasiado fuerte como enunciado. Tenga en cuenta, no obstante, que en la aproximación de Bohm como discutiremos más tarde en este capítulo, las partículas están «acompañadas» de ondas de probabilidad; es decir, la teoría de Bohm siempre apela a partículas y ondas, mientras que la aproximación estándar concibe una complementariedad que puede resumirse aproximadamente como partículas u ondas. Así pues, la conclusión tras la que vamos —que la descripción meca-nocuántica del pasado sería incompleta si hablamos exclusivamente de que una partícula ha pasado por un único punto en el espacio en cada instante definido en el tiempo (lo que haríamos en física clásica)— es cierta de todas formas. En la aproximación convencional a la mecánica cuántica debemos incluir también una enorme variedad de otras localizaciones que podría haber ocupado una partícula en un instante dado, mientras que en la aproximación de Bohm debemos incluir también la onda «piloto», un objeto que también se extiende a lo largo de una enorme variedad de otras localizaciones. (El lector experto debería advertir que la onda piloto es simplemente la función de onda de la

mecánica cuántica convencional, aunque su encarnación en la teoría de Bohm es bastante diferente.) Para evitar matizaciones interminables, la discusión que sigue se hará desde la perspectiva de la mecánica cuántica convencional (la aproximación más ampliamente utilizada), dejando los comentarios sobre la aproximación de Bohm y otras para la última parte del capítulo. **<<**

[7.3] Para una explicación matemática pero muy pedagógica ver R. P. Feynman y A.R. Hibbs, Quantum Mechanics and Path Integráis (Burr Ride-ge, III, McGraw-Hill Higher Education, 1965). **<<**

[7.4] Quizá esté tentado a apelar a la discusión del capítulo 3, en la que aprendimos que a la velocidad de la luz el tiempo se frena hasta pararse, para argumentar que desde la perspectiva del fotón todos los instantes son el mismo instante, de modo que el fotón «sabe» cómo está el interruptor del detector cuando pasa por el divisor de haz. Sin embargo, estos experimentos pueden realizarse con otros tipos de partículas, tales como electrones, que viajan más lentas que la luz, y los resultados no cambian. Así pues, esta perspectiva no ilumina la física esencial. **<<**

[7.5] El montaje experimental discutido, así como resultados experimentales que lo confirman, procede de Y. Kim, R. Yu, S. Kulik, Y. Shih, M. Scully, Phys. Rev. Lett, vol. 84, n.° 1, pp. 1-5. **<<**

[7.6] La mecánica cuántica puede fundamentarse también en una ecuación equivalente presentada en una forma diferente (conocida como mecánica de matrices) por Wemer Heisenberg en 1925. Para el lector con inclinación matemática, la ecuación de Schródinger: HY (x,t) = ih(dY(x,t)/dt), donde H representa el hamiltoniano, Y (x,t) representa la función de onda y h es la constante de Planck. **<<**

[7.7] El lector experto advertirá que aquí estoy suprimiendo un punto sutil. A saber, tendríamos que tomar el conjugado complejo de la función de onda de la partícula para asegurar que es solución de la versión con el tiempo invertido de la ecuación de Schródinger. Es decir, la operación T descrita en la nota 2 del capítulo 6 toma una función de onda Y (x,t) y la aplica en Y* (x,t). Esto no tiene ningún impacto importante sobre la discusión que se hace en el texto. **<<**

[7.8] En realidad Bohm redescubrió y desarrolló una aproximación que se remonta al príncipe Louis de Broglie, de modo que esta aproximación se denomina a veces la aproximación de Broglie-Bohm. **<<**

[7.9] Para el lector con inclinación matemática, la aproximación de Bohm es local en el espacio de configuración pero ciertamente no-local en el espacio real. Cambios en la función de onda en un lugar en el espacio real ejercen inmediatamente una influencia sobre partículas localizadas en otros lugares distantes. **<<**

[7.10] Para un tratamiento excepcionalmente claro de la aproximación de Ghirardi-Rimini-Weber y su relevancia para entender el entrelazamiento cuántico, ver John Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics (Cambridge, Cambridge University Press, 1993). **<<**

[7.11] Algunos físicos consideran que las preguntas en esta lista son subproductos irrelevantes de confusiones anteriores con respecto a la mecánica cuántica. La función de onda, afirma esta visión, es meramente una herramienta teórica para hacer predicciones (probabilistas) y no se le debería atribuir ninguna realidad matemática (una visión a veces llamada la aproximación «calla y calcula», puesto que anima a utilizar la mecánica cuántica y las funciones de onda para hacer pedicciones, sin pararse a pensar sobre lo que las funciones de onda significan y hacen realmente). Una variante de este tema argumenta que las funciones de onda nunca colapsan realmente, sino que las interacciones con el entorno hacen que así lo parezca. (Pronto discutiremos una versión de esta aproximación.) Soy favorable a esta ideas y, de hecho, creo firmemente que en última instancia prescindiremos de la idea de colapso de la función de onda. Pero no encuentro satisfactoria la primera aproximación, pues no estoy dispuesto a renunciar a entender lo que sucede en el mundo cuando no estamos mirando, y la segunda —aunque, en mi opinión, en la dirección correcta— necesita más desarrollo matemático. La conclusión es que la medida hace algo que es o se parece o está enmascarado como un colapso de función de onda. Bien a través de una mejor comprensión de la influencia ambiental o bien a través de alguna otra aproximación aún por sugerir, este efecto aparente tiene que ser abordado, y no simplemente descartado. **<<**

[7.12] Hay otras cuestiones controvertidas asociadas con la interpretación de los muchos mundos que van más allá de su extravagancia obvia. Por ejemplo, hay problemas técnicos para definir una noción de probabilidad en un contexto que incluye un número infinito de copias de cada uno de los observadores cuyas medidas se suponen sometidas a dichas probabilidades. Si un observador dado es realmente una de entre muchas copias, ¿en qué sentido podemos decir que él tiene una probabilidad particular de medir este o aquel resultado? ¿Quién es «él»? Cada copia del observador medirá —con probabilidad 1— cualquier resultado que se dé en esa copia particular del universo en el que reside, de modo que el marco probabilista entero requiere (y se le ha dado, y sigue dándosele) un examen cuidadoso en el marco de los Muchos Mundos. Además, en una nota más técnica, el lector con inclinación matemática se dará cuenta de que, dependiendo de cómo se definan exactamente los Muchos Mundos, quizá haya que seleccionar una base propia privilegiada. Pero ¿cómo debería escogerse dicha base propia? Ha habido muchas discusiones y se ha escrito mucho sobre todas estas cuestiones, pero hasta la fecha no hay ninguna solución umversalmente aceptada. La aproximación basada en la decoherencia, discutida brevemente, ha arrojado mucha luz sobre estas cuestiones y ha ofrecido una intuición concreta sobre la cuestión de la selección de la base propia. **<<**

[7.13] La aproximación de Bohm o de De Broglie-Bohm nunca ha recibido amplia atención. Quizá una razón para esto, como señalaba John Bell en su artículo «The Impossible Pilot Wave», recogido en Speakable and Unspe-akable in Quantum Mechanics, es que ni De Broglie ni Bohm estaban particularmente orgullosos de lo que habían desarrollado. Pero, de nuevo como señala Bell, la aproximación de De Broglie-Bohm prescinde de buena parte de la vaguedad y subjetividad de la aproximación más estándar. Aunque no hubiera otra razón, incluso si la aproximación es errónea, vale la pena saber que las partículas pueden tener posiciones definidas y velocidades definidas en todos los instantes (que están más allá de nuestra capacidad de medir, incluso en principio), y seguir ajustándose perfectamente a las predicciones de la mecánica cuántica estándar —incertidumbre y demás—. Otro argumento en contra de la aproximación de Bohm es que la no-localidad en este marco es más «severa» que la de la mecánica cuántica estándar. Por esto se entiende que la aproximación de Bohm tiene interacciones no-locales (entre la función de onda y las partículas) como un elemento central de la teoría desde el principio, mientras que en mecánica cuántica la no-localidad está enterrada más profundamente y aparece sólo a través de correlaciones no-locales entre medidas ampliamente separadas. Pero, como han argumentado los defensores de esta aproximación, el que algo esté oculto no lo hace menos presente y, además, como la aproximación estándar es vaga con respecto al problema de la mecánica cuántica —el mismo lugar donde se hace evidente la no-localidad— una vez que la cuestión esté completamente resuelta quizá la no-localidad no esté tan oculta después de

todo. Otros han argumentado que hay obstáculos para hacer una versión relativista de la aproximación de Bohm, aunque también se han hecho progresos en este frente (ver, por ejemplo, John Bell, Beables for Quantum Field Theory, en el volumen recopilado indicado arriba). Y así, decididamente vale la pena tener en mente esta aproximación alternativa, incluso si sólo es una protección contra conclusiones precipitadas acerca de lo que la mecánica cuántica implica inevitablemente. Para el lector con inclinación matemática, un tratamiento muy bonito de la teoría de Bohm y las cuestiones del entrelazamiento cuántico puede encontrarse en Tim Maudlin, Quantum Non-locality and Relativity (Malden, Mass., Blackwell, 2002). **<<**

[7.14] Para una discusión en profundidad de la flecha del tiempo en general, y el papel de la decoherencia en particular, ver H. D. Zeh, The Physical Basis of the Direction ofTime (Heidelberg, Springer, 2001). **<<**

[7.15] Sólo para darle una idea de la velocidad con que tiene lugar la decoherencia —con qué rapidez la influencia ambiental suprime la interferencia cuántica y con ello convierte las probabilidades cuánticas en las familiares probabilidades clásicas— he aquí algunos ejemplos. Los números son aproximados, pero el punto que transmiten es claro. La función de onda de un grano de polvo que flota en su sala de estar, bombardeado por moléculas de aire agitadas, sufrirá decoherencia en aproximadamente una trillonésima de trillonésima (10-36) de segundo. Si el grano de polvo se mantiene en una perfecta cámara de vacío y sometido sólo a interacciones con la luz del Sol, su función de onda sufrirá decoherencia un poco más lentamente, necesitante una milésima de trillonésima (10“21) de segundo. Y si el grano de polvo está flotando en las profundidades más oscuras del espacio vacío y sometido solamente a interacciones con los fotones de microondas reliquias del big bang, su función de onda sufrirá decoherencia en aproximadamente una millonésima de segundo. Estos números son extraordinariamente pequeños, lo que demuestra que la decoherencia para algo incluso tan minúsculo como un grano de polvo ocurre muy rápidamente. Para objetos más grandes, la decoherencia ocurre aún más rápida. No es asombroso entonces que, incluso si el nuestro es un universo cuántico, el mundo que nos rodea parezca lo que parece. (Ver, por ejemplo, E. Joos, «Elements of Environmental Decoherence», en Decoherence: Theoretical, Experimental and Conceptual Problems, Ph. Blanchard, D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, I.-O. Stamatescu, eds. [Berlín, Springer, 2000]). **<<**

Capítulo 8

[8.1] Para ser más exactos, la simetría entre las leyes en Connecticut y las leyes en Nueva York hace uso tanto de la simetría de traslación como de la simetría de rotación. Cuando usted actúa en Nueva York, no sólo habrá cambiado de lugar desde Connecticut, sino que es más que probable que inicie sus ejercicios a lo largo de una dirección algo diferente (quizá en dirección este versus dirección norte) que durante sus entrenamientos. **<<**

[8.2] Normalmente se describen las leyes de movimiento de Newton como leyes relevantes para «observadores inerciales», pero cuando uno mira cómo se especifican tales observadores, todo suena circular: los observadores inerciales son aquellos observadores para los que son válidas las leyes de Newton. Una buena manera de considerar lo que está sucediendo en realidad es que las leyes de Newton dirigen nuestra atención a una clase grande y particularmente útil de observadores: aquellos cuya descripción del movimiento encaja completa y cualitativamente dentro del marco de Newton. Por definición, éstos son observadores inerciales. De forma operacional, los observadores inerciales son aquellos sobre los que no están actuando fuerzas de ningún tipo —es decir, observadores que no experimentan aceleraciones—. La relatividad general de Einstein, por el contrario, se aplica a todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento. **<<**

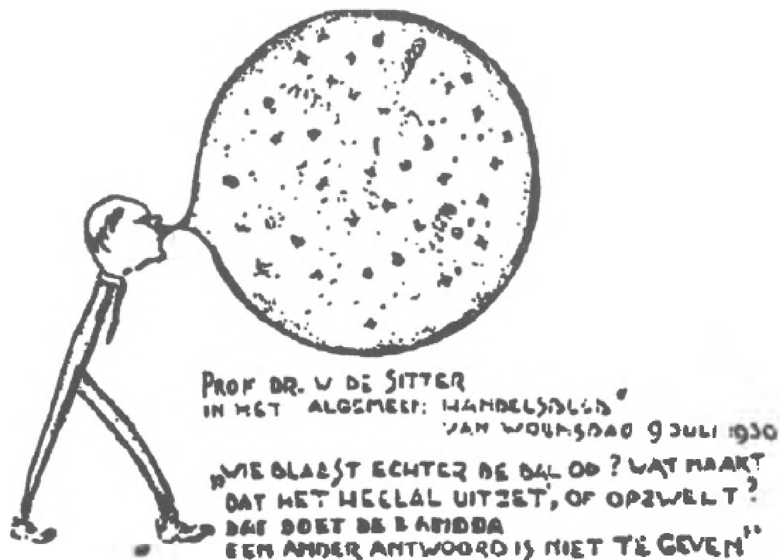
[8.3] Si viviéramos en una era durante la cual se hubiera detenido todo cambio, no experimentaríamos ningún paso del tiempo (todas las funciones del cuerpo y del cerebro también estarían congeladas). Pero que esto significara que el bloque espaciotemporal en la figura 5.1 llegaba a un final o, por el contrario, seguía sin ningún cambio a lo largo del eje del tiempo —es decir, si el tiempo llegaría a un final o seguiría existiendo en algún tipo de sentido formal y primario— es una pregunta hipotética que es a la vez difícil de resolver y básicamente irrelevante para algo que pudiéramos medir o experimentar. Adviértase que esta situación hipotética es diferente de un estado de desorden máximo en el que la entropía no puede aumentar más, pero siguen teniendo lugar cambios microscópicos, como que las moléculas de gas sigan un camino u otro. **<<**

[8.4] La radiación cósmica de microondas fue descubierta en 1964 por los científicos Amo Penzias y Robert Wilson, del Laboratorio Bell, mientras probaban una gran antena diseñada para uso en comunicaciones por satélite. Penzias y Wilson encontraron un mido de fondo que se mostraba imposible de eliminar (incluso después de rascar los excrementos de pájaro —«raido blanco»— del interior de la antena) y, con las ideas clave de Robert Dicke en Princeton y sus estudiantes Peter Roll y David Wilkinson, junto con Jim Pee-bles, se comprendió finalmente que la antena estaba captando radiación de microondas que se originó en el big bang. (Un importante trabajo en cosmología que fijó el escenario para este descubrimiento fue realizado antes por George Gamow, Ralph Alpher y Robert Hermán.) Como discutimos en capítulos posteriores, la radiación nos da una imagen no adulterada del universo cuando tenía unos 300.000 años. Fue entonces cuando las partículas cargadas eléctricamente como electrones y protones, que interrumpen el movimiento de los rayos luminosos, se combinaron para formar átomos eléctricamente neutros que, en general, permiten que la luz viaje libremente. Desde entonces, esa luz antigua —producida en las primeras etapas del universo— ha viajado sin obstáculos, y hoy llena todo el espacio con fotones de microondas. **<<**

[8.5] El fenómeno físico implicado aquí, como se discute en el capítulo 11, se conoce como desplazamiento hacia el rojo. Los átomos comunes tales como el hidrógeno y el oxígeno emiten luz a longitudes de onda que han sido bien documentadas en experimentos de laboratorio. Cuando tales sustancias son constituyentes de galaxias que se alejan, la luz que emiten se alarga, de la misma forma que la sirena de un coche de policía que se aleja también se alarga haciendo que disminuya el tono. Puesto que el rojo es la máxima longitud de onda de la luz que puede verse a simple vista, este estiramiento de la luz se denomina efecto de desplazamiento hacia el rojo. La cantidad de desplazamiento hacia el rojo crece cuando aumenta la velocidad de recesión, y por ello midiendo las longitudes de onda de la luz recibida y comparándola con resultados de laboratorio puede determinarse la velocidad de objetos lejanos. (Éste es en realidad solo un tipo de desplazamiento hacia el rojo, similar al efecto Doppler. Los desplazamientos hacia el rojo también pueden ser causados por la gravedad: los fotones se alargan cuando remontan un campo gravitatorio.) **<<**

[8.6] Más exactamente, el lector con inclinación matemática advertirá que una partícula de masa m, situada en la superficie de una bola de radio R y densidad de masa r, experimenta una aceleración d2R/dt2 dada por (4p/3)R3Gr/R2, y así (1/R) d2R/dt2 = (4p/3)Gr. Si identificamos formalmente R con el radio del universo, y r con la densidad de masa del universo, ésta es la ecuación de Einstein para la evolución del tamaño del universo (suponiendo ausencia de presión). **<<**

[8.7] Ver P. J. Peebles, Principies of Physical Cosmology (Princeton, Princeton University Press, 1993), p. 81.



El pie de figura dice: «¿Pero quién está inflando realmente este globo? ¿Qué hace que el universo se expanda o infle? ¡Un Lambda hace el trabajo!» No vale otra respuesta. Lambda se refiere a algo conocido como la constante cosmológica, una idea que encontraremos en el capítulo 10. **<<**

[8.8] Para evitar confusión, déjeme señalar que un inconveniente del modelo de las monedas es que cada moneda es esencialmente idéntica a todas las demás, mientras que esto no es cierto para las galaxias. Pero el punto importante es que se cree que en la mayor de las escalas —escalas de 100 millones de años-luz— las diferencias individuales entre galaxias se promedian, de modo que cuando se analizan volúmenes enormes de espacio las propiedades globales de cada uno de estos volúmenes son extraordinariamente similares a las propiedades de cualquier otro. **<<**

[8.9] Usted también podría viajar hasta el borde exterior de un agujero negro y permanecer allí con los motores encendidos para evitar caer dentro. El fuerte campo gravitatorio del agujero negro se manifiesta en una severa deformación del espaciotiempo, y eso da como resultado que su reloj marche mucho más lento de lo que lo haría en lugar más normal en la galaxia (como en una extensión espacial relativamente vacía). De nuevo, la duración del tiempo medida por su reloj es perfectamente válida pero, puesto que va a alta velocidad, es una perspectiva totalmente individualista. Cuando se analizan las características del universo en conjunto, es más útil tener una noción de tiempo transcurrido ampliamente aplicable y consensuada, y ésa es la que proporcionan los relojes que se mueven con el flujo cósmico de la expansión espacial y que están sometidos a un campo gravitatorio mucho más suave. **<<**

[8.10] El lector con inclinación matemática notará que la luz viaja a lo largo de geodésicas nulas de la métrica espaciotemporal que, por definición, podemos tomar como ds2 = dt2 - ¿z2(t)(dx2), donde dx2 = dx 2 + dx22 + dx32, y las x¡ son coordenadas comóviles. Haciendo ds2 = 0, que es apropiado para una geodésica nula, podemos escribir | (dt/a(t)) para la distancia total que la luz emitida en el instante t puede recorrer en el instante to. Si multiplicamos esto por valor del factor de escala a(to) en el instante to, entonces habremos calculado la distancia física que ha viajado la luz en este intervalo de tiempo. Este algoritmo puede ser ampliamente utilizado para calcular hasta dónde puede viajar la luz en cualquier intervalo de tiempo dado, lo que revela si dos puntos en el espacio, por ejemplo, están en contacto causal. Como puede ver, en el caso de expansión acelerada, incluso para to arbitrariamente grande, la integral está acotada, lo que demuestra que la luz nunca alcanzará lugares arbitrariamente lejanos. Así, en un universo con expansión acelerada, hay lugares con los que nunca podremos comunicamos y, recíprocamente, regiones que nunca pueden comunicarse con nosotros. Se dice que tales regiones están más allá de nuestro horizonte cósmico. **<<**

[8.11] Cuando analizan formas geométricas, los matemáticos y los físicos utilizan una aproximación cuantitativa a la curvatura, desarrollada en el siglo xix, que hoy es parte de un corpus de conocimiento matemático conocido como geometría diferencial. Una forma no técnica de considerar esta medida de curvatura es estudiar triángulos dibujados en o dentro de la forma de interés. Si los ángulos del triángulo suman 180 grados, como lo hacen cuando se dibuja en un tablero plano, decimos que la forma es plana. Pero si los ángulos suman más o menos que 180 grados, como hacen cuando el triángulo está dibujado en la superficie de una esfera (la hinchazón hacia afuera de la esfera hace que la suma de los ángulos supere los 180 grados) o en la superficie de una silla de montar (la contracción hacia adentro de la forma de una silla hace que la suma de los ángulos sea menor que los 180 grados), decimos que la forma es curvada. Esto se ilustra en la figura 8.6. **<<**

[8.12] Si usted pegara los bordes verticales opuestos de un toro (lo que es razonable, puesto que están identificados (cuando usted atraviesa un borde inmediatamente reaparece en el otro) obtendría un cilindro. Y si luego hiciera lo mismo con los bordes superior e inferior (que ahora serían en forma de círculos), usted obtendría un donut. Así, un donut es otra manera de considerar o representar un toro. Una complicación de esta representación es que el donut ya no parece plano. Sin embargo, realmente lo es. Utilizando la noción de curvatura dada en la nota anterior, usted encontraría que todos los triángulos dibujados en la superficie del donut tienen ángulos que suman 180 grados. El hecho de que el donut parezca curvado es un artificio que resulta de la forma en que hemos insertado una forma bidimensional en nuestro mundo tridimensional. Por esta razón, en el contexto actual es más útil utilizar las representaciones manifiestamente no-curvadas de los toros bi y tridimensionales, como se discute en el texto. **<<**

[8.13] Nótese que hemos sido vagos al distinguir los conceptos de forma y curvatura. Hay tres tipos de curvaturas para el espacio completamente simétrico: positiva, cero y negativa. Pero dos formas pueden tener la misma curvatura y pese a todo no ser idénticas, siendo el ejemplo más simple la pantalla de video plana y el tablero de mesa infinito plano. Así, la simetría nos permite reducir la curvatura del espacio a tres posibilidades, pero hay algo más que tres formas para el espacio (que difieren en lo que los matemáticos llaman sus propiedades globales) que realizan estas tres curvaturas. **<<**

[8.14] Hasta ahora nos hemos centrado exclusivamente en la curvatura del espacio tridimensional —la curvatura de las rebanadas espaciales en la barra espaciotemporal—. Sin embargo, aunque es difícil de imaginar, en los tres casos de curvatura espacial (positiva, cero, negativa), la totalidad del espaciotiempo tetradimensional está curvada, con los tres grados de curvatura haciéndose cada vez mayores a medida que examinamos el universo cada vez más cerca del big bang. De hecho, casi en el instante del big bang la curvatura tetradimensional del espaciotiempo se hace tan grande que las ecuaciones de Einstein dejan de ser válidas. Discutiremos esto más ampliamente en capítulos posteriores. **<<**

Capítulo 9

[9.1] Si usted elevara mucho más la temperatura, encontraría un cuarto estado de la materia conocido como un plasma, en el que los átomos están desintegrados en sus partículas componentes. **<<**

[9.2] Hay sustancias curiosas, tales como las sales Rochelle, que se hacen más ordenadas a altas temperaturas, y menos ordenadas a bajas temperaturas —al revés de lo que se espera normalmente. **<<**

[9.3] Una diferencia entre campos de fuerza y de materia está expresada por el principio de exclusión de Wolfgang Pauli. Este principio muestra que mientras que un enorme número de partículas de fuerza (como los fotones) pueden combinarse para producir campos accesibles a un físico pre-cuántico como Maxwell, campos que usted ve cada vez que entra en una habitación oscura y enciende una luz, las leyes de la física cuántica impiden en general que las partículas de materia cooperen de dicha manera organizada y coherente. (Más exactamente, dos partículas del mismo tipo, tales como dos electrones, no pueden ocupar el mismo estado, mientras que no hay tal restricción para los fotones. Así pues, los campos de materia no tienen en general una manifestación macroscópica de tipo clásico.) **<<**

[9.4] En el marco de la teoría cuántica de campos, cada partícula conocida se ve como una excitación de un campo subyacente asociado con el tipo del que la partícula es un miembro. Los fotones son excitaciones del campo fo-tónico —es decir, el campo electromagnético; un quark-up es una excitación del campo de quarks-up; un electrón es una excitación del campo electrónico, y así sucesivamente—. De este modo, toda la materia y todas las fuerzas se describen en un lenguaje mecanocuántico uniforme. Un problema clave es que se ha mostrado muy difícil describir en este lenguaje todas las características cuánticas de la gravedad, una cuestión que discutiremos en el capítulo 12. **<<**

[9.5] Aunque el campo de Higgs lleva el nombre de Peter Higgs, otros físicos —Thomas Kibble, Philip Anderson, R. Brout y Franngois Eglert, entre otros—• desempeñaron un papel vital en su introducción en la física y su desarrollo teórico. **<<**

[9.6] Tenga en cuenta que el valor del campo está dado por su distancia al centro del cuenco, de modo que incluso si el campo tiene energía cero cuando su valor está en el valle del cuenco (puesto que la altura sobre el valle denota la energía del campo), su valor es distinto de cero. **<<**

[9.7] En la descripción del texto, el valor del campo de Higgs está dado por su distancia al centro del cuenco, y por eso quizá usted se esté preguntando cómo puntos en el valle circular del cuenco —puntos que están todos a la misma distancia del centro del cuenco— dan lugar a valores distintos de Higgs. La respuesta, para el lector con inclinación matemática, es que puntos diferentes en el valle representan valores del campo de Higgs con la misma magnitud pero fases diferentes (el valor del campo de Higgs es un número complejo). **<<**

[9.8] En teoría, dos conceptos de masa entran en la física. Uno es el concepto descrito en el texto: masa como esa propiedad de un objeto que se opone a la aceleración. Normalmente, esta noción de masa se denomina masa inercial. El segundo concepto de masa es el relevante para la gravedad: masa como esa propiedad de un objeto que determina con qué fuerza será atraído por un campo gravitatorio de una intensidad específica (tal como el de la Tierra). Normalmente a esta noción de masa se le denomina masa gravitatoria. A primera vista, el campo de Higgs es relevante solamente para una comprensión de la masa inercial. Sin embargo, el principio de equivalencia de la relatividad general afirma que la fuerza sentida por un movimiento acelerado y por un campo gravitatorio son indistinguibles, es decir, son equivalentes. Y eso implica una equivalencia entre los conceptos de masa inercial y masa gravitatoria. Así, el campo de Higgs es relevante para ambos tipos de masa puesto que, según Einstein, son el mismo. **<<**

[9.9] Agradezco a Rafael Kaspher el haberme señalado que esta descripción es una variante de la metáfora del profesor David Miller, enviada en respuesta al desafío que planteó en 1993 el ministro de Ciencia británico Wi-lliam Waldegrave a la comunidad de la física británica para explicar por qué debería gastarse el dinero de los contribuyentes en buscar la partícula de Higgs. **<<**

[9.10] El lector con inclinación matemática debería advertir que en la teoría electrodébil los fotones y los bosones W y Z se describen en la representación adjunta del grupo SU(2) x U(l), y por ello son intercambiados por la acción de este grupo. Además, las ecuaciones de la teoría electrodébil poseen simetría completa bajo la acción de este grupo y es en este sentido en el que describimos las partículas de fuerza como interrelacionadas. Más exactamente, en la teoría electrodébil el fotón es una mezcla particular del bosón gauge de la simetría U(l) manifiesta y el subgrupo U(l) de SU(2); está así estrechamente relacionado con los bosones gauge débiles. Sin embargo, debido a la estructura producto del grupo de simetría, los cuatro bosones (en realidad hay dos bosones W con cargas eléctricas opuestas) no se mezclan por completo bajo su acción. En cierto sentido, entonces, las interacciones débil y electromagnética son parte de un único marco matemático, pero un marco que no está completamente unificado como podría estarlo. Cuando se incluyen las interacciones fuertes, el grupo aumenta al incluir un factor SU(3) —«color» SU(3) — y el hecho de que este grupo tenga tres factores independientes, SU(3) x SU(2) x U(l), sólo resalta todavía más la falta de unidad completa. Esto es una parte de la motivación para la gran unificación, discutida en la próxima sección: la gran unificación busca un único grupo semisimple —un grupo con un único factor— que describa las fuerzas a escalas de energía más altas. **<<**

[9.11] El lector con inclinación matemática debería advertir que la teoría de gran unificación de Georgi y Glashow se basaba en el grupo SU(5), que incluye a SU(3), el grupo asociado con la fuerza nuclear fuerte, y también a SU(2) x U(l), el grupo asociado con la fuerza electrodébil. Desde entonces, los físicos han estudiado las implicaciones de otros grupos de gran unificación potenciales, tales como SO(IO) y E6. **<<**

Capítulo 10

[10.1] Como hemos visto, el bang del big bang no es una explosión que tuvo lugar en una localización en una extensión espacial pre-existente, y por eso es por lo que no nos hemos preguntado también dónde hizo bang. La descripción bromista de la deficiencia del big bang que hemos utilizado se debe a Alan Guth; ver por ejemplo, su El Universo Inflacionario (Reading, Perseus Books, 1997), p. XIII. **<<**

[10.2] A veces se utiliza el término big bang para denotar el suceso que ocurrió en el propio instante cero, dando nacimiento al universo. Pero puesto que, como discutiremos en el próximo capítulo, las ecuaciones de la relatividad general dejan de ser válidas en el tiempo cero, nadie tiene ninguna idea de qué fue realmente este suceso. Esta omisión es lo que entendemos al decir que la teoría del big bang deja fuera al bang. En este capítulo nos restringimos a dominios en los que las ecuaciones no dejan de ser válidas. La cosmología inflacionaria hace uso de estas ecuaciones con buen comportamiento para mostrar un breve hinchamiento explosivo del espacio que naturalmente tomamos como el bang que deja fuera la teoría del big bang. Ciertamente, no obstante, esta aproximación deja sin responder la pregunta de lo que sucedió en el instante inicial de la creación del universo —si realmente hubo tal instante. **<<**

[10.3] Abraham Pais, Subtle is the Lord. (Oxford, Oxford University Press, 1982), p. 283. **<<**

[10.4] Para el lector con inclinación matemática: Einstein reemplazó la ecuación original Gmn = 8p Tmn por Gmn + L Tmn = 8p Tmn, donde L es un número que denota el tamaño de la constante cosmológica. **<<**

[10.5] Cuando me refiero a la masa de un objeto en este contexto, me estoy refiriendo a la suma total de las masas de sus partículas constituyentes. Si un cubo, pongamos por caso, estuviera compuesto de 1.000 átomos de oro, me estaría refiriendo a 1.000 veces la masa de uno solo de tales átomos. Esta definición concuerda con la perspectiva de Newton. Las leyes de Newton dicen que dicho cubo tendría una masa que es 1.000 veces la de un único átomo de otro, y eso pesaría 1.000 veces más que un único átomo de oro. Según Einstein, no obstante, el peso del cubo depende también de la energía cinética de los átomos (así como de todas las demás contribuciones a la energía del cubo). Esto se sigue de E = me2: más energía (E), independientemente de su fuente, se traduce en más masa (m). Así, una forma equivalente de expresarlo es que, puesto que Newton no conocía E = me2, su ley de la gravedad utiliza una definición de masa que pasa por alto varias contribuciones a la energía, tal como la energía asociada al movimiento. **<<**

[10.6] Esta discusión sugiere la física subyacente pero no la capta por completo. La presión ejercida por el muelle comprimido no influye de hecho en la intensidad con la que la caja es atraída hacia la Tierra. Pero esto se debe a que el muelle comprimido afecta a la energía total de la caja y, como se discute en el párrafo anterior, según la relatividad general es la energía total lo que es relevante. Sin embargo, el punto que estoy explicando aquí es que la propia presión —no sólo a través de la contribución que hace a la energía total— genera gravedad de forma parecida a como lo hacen la masa y la energía. Según la relatividad general, la presión gravita. Nótese también que la gravedad repulsiva a la que nos estamos refiriendo es el campo gravitatorio interno experimentado dentro de una región de espacio llena de algo que tiene presión negativa en lugar de positiva. En tal situación, la presión negativa contribuirá con un campo gravitatorio repulsivo que actúa dentro de la región. **<<**

[10.7] Matemáticamente, la constante cosmológica está representada por un número, normalmente denotado por L (ver nota 4). Einstein encontró que su ecuación tenía perfecto sentido independientemente de que L se escogiera positivo o negativo. La discusión en el texto se centra en el caso de interés particular para la cosmología moderna (y las observaciones modernas, como se discutirá) en el que L es positivo, puesto que esto da lugar a presión negativa y gravedad repulsiva. Un valor negativo para L da gravedad atractiva ordinaria. Nótese, también, que puesto que la presión ejercida por la constante cosmológica es uniforme, esta presión no ejerce directamente ninguna fuerza: sólo las diferencias de presión, como la que sienten sus oídos cuando usted está bajo el agua, dan como resultado una fuerza de presión. Por el contrario, la fuerza ejercida por la constante cosmológica es una fuerza puramente gravitatoria. **<<**

[10.8] Los imanes familiares siempre tienen un polo norte y un polo sur. Por el contrario, las teorías de gran unificación sugieren que puede haber partículas que son como un polo magnético puramente norte o puramente sur. Tales partículas se denominan monopolos y podrían tener un impacto importante en la cosmología del big bang estándar. Nunca han sido observados. **<<**

[10.9] Guth y Tye reconocieron que un campo de Higgs sobreenfriado actuaría como una constante cosmológica, una idea que había tenido antes Martinus Veltman y otros. De hecho, Tye me ha contado que si no fuera por una limitación de páginas en Physical Review Letters, la revista a la que él y Guth enviaron su artículo, ellos no habrían llegado a una frase final en la que señalaban que su modelo implicaría un período de expansión exponencial. Pero Tye señala también que fue mérito de Guth el advertir la importancia de las implicaciones cosmológicas de un período de expansión exponencial (que se discute más tarde en éste y en el próximo capítulo), y con ello puso la inflación en el centro de los mapas de los cosmólogos. En la historia a veces retorcida del descubrimiento, el físico ruso Alexei Starobinsky había encontrado, algunos años antes, un medio de generar lo que ahora llamamos expansión inflacionaria, un trabajo descrito en un artículo que no fue ampliamente conocido entre los científicos occidentales. Sin embargo, Starobinsky no hacía énfasis en que un período de tal expansión rápida resolvería problemas cosmológicos clave (tales como los problemas del horizonte y de la planitud, que serán discutidos pronto), lo que explica, en parte, por qué su trabajo no generó la respuesta entusiasta que recibió el de Guth. En 1981, el físico japonés Katsuhiko Sato desarrolló también una versión de la cosmología inflacionaria, e incluso antes (en 1978), los físicos rusos Gennady Chibisov y Andrei Linde dieron con la idea de inflación, pero advirtieron que, cuando se estudiaba en detalle, adolecía de un problema clave (discutido en la nota 11) y por ello no publicaron su trabajo.

El lector con inclinación matemática debería advertir que no es difícil ver como aparece la expansión acelerada. Una de las ecuaciones de Einstein es (l/a)(d2a/dt2) = -4p/3(r + 3p) donde a, r y p son el factor de escala del universo (su «tamaño»), la densidad de energía y la densidad de presión, respectivamente. Nótese que si el segundo miembro de esta ecuación es positivo, el factor de escala crecerá a un ritmo creciente: el ritmo de crecimiento del universo se acelera con el tiempo. Para un campo de Higgs situado sobre una meseta, su densidad de presión resulta ser igual al negativo de su densidad de energía (esto mismo también es cierto para una constante cosmológica y, así, de hecho, el segundo miembro es positivo). **<<**

[10.10] La física subyacente a estos saltos cuánticos es el principio de incertidumbre expuesto en el capítulo 4. Discutiré explícitamente la aplicación de la incertidumbre cuántica a campos en los capítulos 11 y 12, pero para anticipar ese material nótese brevemente lo siguiente. El valor de un campo en un punto dado del espacio, y la velocidad de cambio del valor del campo en dicho punto, desempeñan el mismo papel para los campos que la posición y velocidad (momento) desempeñan para una partícula. Así pues, de la misma forma que nunca podemos conocer a la vez una posición definida y una velocidad definida para una partícula, un campo no puede tener un valor definido y una velocidad de cambio de dicho valor definida en ningún punto dado del espacio. Cuanto más definido está el valor del campo en un instante, más incierta es la velocidad de cambio de dicho valor —es decir, más probable es que el valor del campo cambie un instante después. Y dicho cambio, inducido por la incertidumbre cuántica, es lo que entiendo cuando me refiero a saltos cuánticos en el valor del campo. **<<**

[10.11] La física subyacente a estos saltos cuánticos es el principio de incertidumbre expuesto en el capítulo 4. Discutiré explícitamente la aplicación de la incertidumbre cuántica a campos en los capítulos 11 y 12, pero para anticipar ese material nótese brevemente lo siguiente. El valor de un campo en un punto dado del espacio, y la velocidad de cambio del valor del campo en dicho punto, desempeñan el mismo papel para los campos que la posición y velocidad (momento) desempeñan para una partícula. Así pues, de la misma forma que nunca podemos conocer a la vez una posición definida y una velocidad definida para una partícula, un campo no puede tener un valor definido y una velocidad de cambio de dicho valor definida en ningún punto dado del espacio. Cuanto más definido está el valor del campo en un instante, más incierta es la velocidad de cambio de dicho valor —es decir, más probable es que el valor del campo cambie un instante después. Y dicho cambio, inducido por la incertidumbre cuántica, es lo que entiendo cuando me refiero a saltos cuánticos en el valor del campo. **<<**

[10.12] Quienes estén familiarizados con la historia de este tema se darán cuenta de que la excitación que provocó descubrimiento de Guth fue generada por las soluciones que daba a problemas cosmológicos clave, tales como los problemas del horizonte y de la planitud, que describiremos en breve. **<<**

Las ideas de Linde y de Albrecht y Steinhardt —ahora llamadas inflación nueva— corregían estos problemas. Cambiando la forma del cuenco de energía potencial por la de la figura 10.2, estos investigadores comprendieron que el inflatón podía relajarse a su valor de energía cero «rodando» cuesta abajo por la colina de energía hasta el valle, un proceso gradual que no tenía necesidad del salto cuántico de la propuesta original. Y, como demostraron sus cálculos, este rodamiento algo más gradual cuesta abajo prolongaba suficientemente la ráfaga inflacionaria de modo que una única burbuja se hacía suficientemente grande para abarcar el universo observable entero. Así, en esta aproximación, no hay necesidad de preocuparse por burbujas que se fusionan. Y lo que es de la misma importancia, antes que convertir la energía del campo inflatón en la de partículas y radiación ordinarias mediante colisiones de burbujas, en la nueva aproximación el inflatón conseguía gradualmente esta conversión de energía de forma uniforme a lo largo del espacio por un proceso afín a la fricción: a medida que el campo rodaba cuesta abajo —uniformemente en todo el espacio— cedía su energía «frotando contra» (interaccionando con) campos más familiares para partículas y radiación. La inflación nueva retenía así todos los éxitos de la aproximación de Guth, pero

resolvía los problemas importantes con los que ésta se había encontrado.

Aproximadamente un año después del importante avance que proporcionó la inflación nueva, Andrei Linde tuvo otra idea revolucionaria. Para que la inflación nueva ocurra satisfactoriamente, todo un número de elementos clave debe caer en su sitio: el cuenco de energía potencial debe tener la forma correcta, el valor del campo inflatón debe empezar alto en el cuenco (y, de forma algo más técnica, el valor del campo inflatón debe ser uniforme sobre una extensión espacial suficientemente grande). Aunque es posible que el universo alcance tales condiciones, Linde encontró una manera de generar una ráfaga inflacionaria en un escenario más simple y menos retorcido. Linde advirtió que incluso con un cuenco de energía potencial simple, como el de la figura 9.1a, e incluso sin preparar con detalle el valor inicial del campo inflatón, la inflación podía seguir teniendo lugar de forma natural. La idea es ésta. Imagine que en el mismo universo primitivo las cosas eran «caóticas» —por ejemplo, imagine que había un campo inflatón cuyo valor bailaba aleatoriamente entre un número y otro—. En un lugar en el espacio su valor podría haber sido pequeño, en otro lugar su valor podría haber sido intermedio, y en otro lugar del espacio su valor podría haber sido alto. Ahora, nada particularmente digno de atención habría sucedido en regiones donde el valor del campo era pequeño o intermedio. Pero Linde comprendió que algo fantásticamente interesante habría tenido lugar en regiones donde el campo inflatón hubiera alcanzado un valor alto (incluso si la región fuera minúscula, apenas 10-33 centímetros de diámetro). Cuando el valor del campo inflatón es alto —cuando está alto en el cuenco de energía de la figura 9. la— empieza un tipo de fricción cósmica: el valor del campo trata de rodar cuesta abajo hasta una

energía potencial menor, pero su alto valor contribuye a una fuerza de fricción resistiva, y por ello rueda muy lentamente. Así, el valor del campo inflatón habría sido casi constante y (de forma muy similar a un inflatón en la parte superior de la colina de energía potencial en la inflación nueva) habría aportado una energía y una presión negativa aproximadamente constantes. Como ahora sabemos, éstas son las condiciones requeridas para impulsar una ráfaga de expansión inflacionaria. Así, sin apelar a un cuenco de energía potencial muy especial, y sin colocar el campo inflatón en una configuración especial, el entorno caótico del universo primitivo podría haber dado lugar de forma natural a una expansión inflacionaria. No es nada sorprendente que Linde llamara a esta aproximación inflación caótica. Muchos físicos consideran que es la realización más convincente del paradigma inflacionario. **<<**

[10.13] Usted podría preguntarse si el campo de Higgs electrodébil, o el campo de Higgs de gran unificación, pueden hacer una doble tarea: desempeñar el papel que describimos en el capítulo 9 e impulsar también la expansión inflacionaria en instantes anteriores, antes de la formación de un océano de Higgs. Se han propuesto modelos de este tipo, pero normalmente adolecen de problemas técnicos. Las realizaciones más convincentes de la expansión inflacionaria incluyen un nuevo campo de Higgs para desempeñar el papel del inflatón. **<<**

[10.14] Ver nota 11 de este capítulo. **<<**

[10.15] Por ejemplo, usted podría considerar nuestro horizonte como una esfera imaginaria gigante en cuyo centro estamos nosotros, que contiene aquellas cosas con las que podíamos haber comunicado (las cosas dentro de la esfera) en el tiempo transcurrido desde el bang. Hoy, el radio de nuestra «esfera horizonte» es aproximadamente 14.000 millones de años-luz; en el comienzo de la historia del universo, su radio era mucho menor, puesto que había habido mucho menos tiempo para que viajara la luz. Ver también la nota 10 del capítulo 8. **<<**

[10.16] Aunque así es en esencia cómo la cosmología inflacionaria resuelve el problema del horizonte, para evitar confusiones déjeme resaltar un elemento clave de la solución. Si una noche usted y un amigo están en un campo intercambiando felizmente señales de luz encendiendo y apagando linternas, note que por muy rápido que ustedes se alejen, siempre podrán intercambiar señales de luz. ¿Por qué? Bien, para que usted no llegue a recibir la luz de la linterna de su amigo, o para que su amigo no llegue a recibir la luz que usted le envía, ustedes tendrían que alejarse a una velocidad mayor que la de la luz, y eso es imposible. Así, ¿cómo es posible que regiones del espacio que eran capaces de intercambiar señales de luz al principio de la historia del universo (y llegar así a la misma temperatura, por ejemplo) se encuentren ahora más allá del alcance comunicativo de las demás? Como el ejemplo de la linternas deja claro, debe ocurrir que ellas se estaban alejando a una velocidad mayor que la de la luz. Y, de hecho, el colosal empuje hacia afuera de la gravedad repulsiva durante la fase inflacionaria impulsó a cada región del espacio a alejarse de todas las demás a una velocidad mucho mayor que la de la luz. De nuevo, esto no presenta ninguna contradicción con la relatividad especial, puesto que la velocidad límite fijada por la luz se refiere a movimiento a través del espacio, no a movimiento derivado del propio hinchamiento del espacio. De modo que una característica nueva e importante de la cosmología inflacionaria es que implica un corto período en el que hay expansión superlumínica del espacio. **<<**

[10.17] Note que el valor numérico de la densidad crítica disminuye a medida que el universo se expande. Pero el punto importante es que si la densidad real de masa/energía del universo es igual a la densidad crítica en un instante, disminuirá exactamente de la misma manera y seguirá siendo igualdad a la densidad crítica en todo instante. **<<**

[10.18] El lector con inclinación matemática debería advertir que durante la fase inflacionaria el tamaño de nuestro horizonte cósmico permaneció fijo aunque el espacio se hinchaba enormemente (como puede verse fácilmente tomando una forma exponencial para el factor de escala en la nota 10 del capítulo 8). En este sentido es en el que, en el marco inflacionario, nuestro universo observable es una mota minúscula en un cosmos gigantesco. **<<**

[10.19] R. Preston, First Light (Nueva York, Random House Trade Paper-marks, 1996), p. 118. **<<**

[10.20] Para una excelente exposición de la materia oscura a un nivel general ver L. Krauss, Quintessence: The Mystery of Missing Mass in the Uni-verse (Nueva York, Perseus, 2000). **<<**

[10.21] El lector experto reconocerá que no estoy distinguiendo entre los diversos problemas de materia oscura que emergen en diferentes escalas de observación (galáctica, cósmica) pues la contribución de materia oscura a la densidad de masa cósmica es lo único que me interesa aquí. **<<**

[10.22] Hay en realidad alguna controversia en cuanto a si éste es el mecanismo detrás de todas las supemovas de tipo la (agradezco a D. Spergel por señalarme esto), pero la uniformidad de estos sucesos —que es lo que necesitamos para la discusión— tiene una firme base observacional. **<<**

[10.23] Para una excelente exposición de la materia oscura a un nivel general ver L. Krauss, Quintessence: The Mystery of Missing Mass in the Uni-verse (Nueva York, Perseus, 2000). **<<**

[10.24] El lector experto reconocerá que no estoy distinguiendo entre los diversos problemas de materia oscura que emergen en diferentes escalas de observación (galáctica, cósmica) pues la contribución de materia oscura a la densidad de masa cósmica es lo único que me interesa aquí. **<<**

Capítulo 11

[11.1] Entre los líderes de principios de la década de 1980 en la determinación de cómo las fluctuaciones cuánticas darían inhomogeneidades estaban Stephen Hawking, Alexei Starobinsky, Alan Guth, So-Young Pi, James Bar-deen, Paul Steinhardt, Michael Tumer, Viatcheslav Mukhanov y Gennady Chibisov. **<<**

[11.2] Quizá siga usted intrigado, a pesar de la discusión que se hace en el texto principal, por el hecho de que una minúscula cantidad de masa/energía en una pepita inflatón pudiera dar la enorme cantidad de masa/energía que constituye el universo observable. ¿Cómo se puede terminar con más masa/energía que con la que se empezó? Bien, como se explica en el texto principal, el campo inflatón, en virtud de su presión negativa, «chupa» energía de la gravedad. Esto significa que a medida que aumenta la energía en el campo inflatón, disminuye la energía en el campo gravitatorio. La característica especial del campo gravitatorio, conocida desde los días de Newton, es que su energía puede hacerse arbitrariamente negativa. Así pues, la gravedad es como un banco que está dispuesto a prestar cantidades ilimitadas de dinero —la gravedad encarna un suministro esencialmente ilimitado de energía, que el campo inflatón extrae a medida que el universo se expande.

La masa y el tamaño concretos de la pepita inicial del campo inflatón uniforme depende de los detalles del modelo de cosmología inflacionaria que se estudia (muy especialmente, de los detalles precisos del cuenco de energía potencial del campo inflatón). En el texto, yo he imaginado que la densidad de energía del campo inflatón era de unos 1082 gramos por centímetro cúbico, de modo que un volumen de (10“26 centímetros)3 = 10 78 centímetros cúbicos tendría una masa total de unos 10 kilogramos. Estos valores son típicos de una clase bastante convencional de modelos inflacionarios, pero sólo pretenden darle una noción aproximada de los números implicados. Para dar una idea del rango de posibilidades, déjeme señalar que en los modelos de inflación caótica de Andrei

Linde (ver nota 11 del capítulo 10), nuestro universo observable habría surgido de una pepita inicial de tamaño aún menor, 10~33 centímetros de diámetro (la denominada longitud de Planck), cuya densidad de energía era aún mayor, unos 1094 gramos por centímetro cúbico, que se combinan para dar una masa total menor de unos 10-5 gramos (la denominada >masa de Planck). En estas versiones de la inflación, la pepita inicial habría pesado tanto como un grano de polvo. **<<**

[11.3] Ver Paul Davies, «Inflation and Time Asymmetry in the Universe», en Nature, vol. 301, p. 398; Don Page, «Inflation Does Not Explain Time Asymmetry», en Nature, vol. 304, p. 39, y Paul Davies, «Inflation in the Universe and Time Asymmetry», en Nature, vol. 312, p. 324. **<<**

[11.4] Para explicar el punto esencial es conveniente separar la entropía en una parte debida al espaciotiempo y la gravedad, y una parte restante debida a todo lo demás, pues esto recoge intuitivamente las ideas clave. Sin embargo, debería advertir que se muestra escurridizo dar un tratamiento matemático riguroso en el que la contribución gravitatoria a la entropía esté limpiamente identificada, separada y explicada. No obstante, esto no compromete las conclusiones cualitativas a las que llegamos. En caso de que usted encuentre esto molesto, note que toda la discusión puede ser reexpresada básicamente sin referencia a la entropía gravitatoria. Como subrayamos en el capítulo 6, cuando la gravedad atractiva ordinaria es relevante la materia se une en grumos. Al hacerlo, la materia convierte la energía potencial gravitatoria en energía cinética que, posteriormente, se convierte parcialmente en radiación que emana del propio grupo. Ésta es una secuencia de sucesos de entropía creciente (mayores velocidades medias de las partículas incrementan el volumen del espacio de fases relevante; la producción de radiación mediante interacciones incrementa el número total de partículas —y ambos incrementan la entropía total—). De esta manera, lo que llamamos en el texto entropía gravitatoria puede ser reexpresada como entropía de materia generada por la fuerza gravitatoria. Cuando decimos que la entropía gravitatoria es baja, queremos decir que la fuerza gravitatoria tiene la capacidad de generar cantidades importantes de entropía mediante condensación gravitatoria. Al realizar tal potencial de entropía, los grumos de materia crean un campo gravitatorio no uniforme y no homogéneo —deformaciones

y rizos en el espaciotiempo— que, en el texto, he descrito como de entropía más alta. Pero como aclara esta discusión, realmente puede considerarse en el sentido de que la materia aglomerada (y la radiación producida en el proceso) tiene entropía más alta (que cuando está uniformemente dispersa). Esto es bueno puesto que el lector experto advertirá que si viéramos un fondo gravitatorio clásico (un espaciotiempo clásico) como un estado coherente de gravitones, éste es un estado esencialmente único y por ello tiene baja entropía. Sólo con un granulado grueso apropiado sería posible una asignación de entropía. Como subraya esta nota, no obstante, eso no es particularmente necesario. Por el contrario, si hubiera acumulación de materia suficiente para crear agujeros negros, entonces dispondríamos de una asignación de entropía incuestionable : el área del horizonte de sucesos del agujero negro (como se explica en el capítulo 16) es una medida de la entropía del agujero negro, y esta entropía puede ser llamada inequívocamente entropía gravitatoria. **<<**

[11.5] De la misma forma que es posible que un huevo se rompa y que las piezas de la cáscara rota se reagrupen en un huevo intacto, es posible que las fluctuaciones cuánticamente inducidas crezcan para dar inhomogeneidades mayores (como hemos descrito) o que inhomogeneidades suficientemente correlacionadas trabajen a la par para inhibir dicho crecimiento. Así, la contribución inflacionaria para resolver la flecha del tiempo requiere también fluctuaciones cuánticas suficientemente poco correlacionadas. De nuevo, si pensamos a la manera de Boltzmann, entre todas las fluctuaciones que dan condiciones para la inflación, más pronto o más tarde habrá una que satisfaga también esta condición, lo que permite que se inicie el universo tal y como lo conocemos. **<<**

[11.6] Hay físicos que afirmarían que la situación es mejor que la descrita. Por ejemplo, Andrei Linde argumenta que en la inflación caótica (ver nota 11, capítulo 10), el universo observable salió de una pepita de tamaño de Planck que contenía un campo inflatón con densidad de energía a escala de Planck. Bajo ciertas hipótesis, Linde argumenta además que la entropía de un campo inflatón uniforme en dicha pepita minúscula es aproximadamente igual a la entropía de cualquier otra configuración de campo inflatón, y por eso las condiciones necesarias para conseguir la inflación no eran especiales. La entropía de la pepita de tamaño de Planck era pequeña pero del mismo orden de la entropía podría haber tenido la pepita del tamaño de Planck. La consiguiente ráfaga inflacionaria creó entonces, en un destello, un universo enorme con una entropía enormemente más alta —pero un universo que, debido a su distribución suave y uniforme de materia, estaba también enormemente lejos de la entropía que podría tener—. La flecha del tiempo apunta en la dirección en la que está disminuyendo este agujero de entropía.

Aunque yo soy favorable a esta visión optimista, hasta que tengamos una idea mejor de la física de la que se supone que ha surgido la inflación, se recomienda cautela. Por ejemplo, el lector experto advertirá que esta aproximación hace hipótesis favorables pero injustificadas sobre los modos del campo (transplanckiano) de alta energía —modos que pueden afectar al inicio de la inflación y desempeñar un papel clave en la formación de estructuras. **<<**

Capítulo 12

[12.1] La prueba circunstancial que tengo en mente aquí descansa en el hecho de que las intensidades de las tres fuerzas no-gravitatorias dependen de la energía y temperatura del ambiente en el que las fuerzas actúan. A bajas energías y temperaturas, tales como las de nuestro entorno cotidiano, las intensidades de las tres fuerzas son diferentes. Pero hay evidencia teórica y experimental indirecta de que a temperaturas muy altas, tales como las que se dieron en los primeros instantes del universo, las intensidades de las tres fuerzas convergen, lo que indica, aunque indirectamente, que las tres fuerzas pueden estar fundamentalmente unificadas, y aparecer distintas sólo a bajas energías y temperaturas. Para una discusión más detallada ver, por ejemplo, El universo elegante, capítulo 7. **<<**

[12.2] Una vez que sabemos que un campo, como cualquiera de los campos de fuerzas conocidos, es un ingrediente en la constitución del cosmos, entonces sabemos que existe en todas partes —está cosido en el tejido del cosmos—. Es imposible extirpar el campo, igual que es imposible extirpar el propio espacio. Lo más cerca que podemos llegar a eliminar la presencia de un campo, por consiguiente, es hacer que tome un valor que minimice su energía. Para campos de fuerzas, como la fuerza electromagnética, dicho valor es cero, como se discute en el texto. Para campos como el inflatón o el campo de Higgs del modelo estándar (que, por simplicidad, no consideramos aquí), dicho valor puede ser algún número no-nulo que depende de la forma precisa de la energía potencial del campo, como discutimos en los capítulos 9 y 10. Como se menciona en el texto, para simplificar la discusión sólo estamos discutiendo explícitamente fluctuaciones cuánticas de campo cuyo estado de mínima energía se consigue cuando su valor es cero, aunque las fluctuaciones asociadas con campos de Higgs o campos inflatón no requieren ninguna modificación de nuestras conclusiones. **<<**

[12.3] En realidad, el lector con inclinación matemática debería advertir que el principio de incertidumbre dicta que las fluctuaciones de energía son inversamente proporcionales a la resolución temporal de nuestras medidas, de modo que cuanto más fina es la resolución temporal con la que examinamos la energía de un campo, más incontroladamente ondulará el campo. **<<**

[12.4] En este experimento, Lamoreaux comprbó la fuerza de Casimir en un montaje modificado que implica la atracción entre una lente esférica y una placa de cuarzo. Más recientemente, Gianni Carugno, Roberto Onofrio y sus colaboradores en la Universidad de Padua han emprendido el experimento más difícil que implica el marco de Casimir original de dos placas paralelas. (Mantener las placas perfectamente paralelas es un gran desafío experimental.) Hasta ahora, ellos han confirmado las predicciones de Casimir con un margen de error del quince por 100. **<<**

[12.5] Visto en retrospectiva, estas intuiciones demuestran también que si Einstein no hubiera introducido la constante cosmológica en 1917, los físicos cuánticos habrían introducido su propia versión unas décadas más tarde. Como usted recordará, la constante cosmológica era una energía que Einstein imaginaba llenando todo el espacio, pero cuyos orígenes, él y los proponentes actuales de una constante cosmológica, dejaron sin especificar. Ahora entendemos que la física cuántica llena el espacio vacío con campos agitados, y como vemos directamente a través del experimento de Casimir, el campo microscópico resultante llena frenéticamente el espacio con energía. De hecho, un desafío importante al que se enfrenta la física teórica es demostrar que la contribución combinada de todas las agitaciones de los campos da una energía total en el espacio vacío —una constante cosmológica total— que está dentro del límite observacional actualmente determinado por las observaciones de superno vas discutidas en el capítulo 10. Hasta ahora, nadie ha sido capaz de hacerlo; llevar a cabo el análisis exactamente se ha mostrado más allá de la capacidad de los métodos teóricos actuales, y cálculos aproximados han dado respuestas muchísimo mayores que lo que permiten las observaciones, lo que sugiere con fuerza que las aproximaciones son incorrectas. Muchos consideran que explicar el valor de la constante cosmológica (ya sea cero, como se pensó durante mucho tiempo, o pequeña y no-nula como sugiere la inflación y los datos de supemovas) es uno de los problemas abiertos más importantes en física teórica. **<<**

[12.6] En esta sección describo una manera de ver el conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica. Pero debería advertir, en consonancia con nuestra idea de buscar la verdadera naturaleza del espacio y el tiempo, que otros enigmas menos tangibles pero potencialmente importantes surgen al tratar de fusionar relatividad general y mecánica cuántica. Uno que es particularmente tentador surge cuando la aplicación directa del procedimiento para transformar teorías no-gravitatorias clásicas (como la electrodinámica de Maxwell) en una teoría cuántica se extiende a la relatividad general clásica (como demostró Bryce DeWitt en lo que ahora se conoce como la ecuación Wheeler-DeWitt). En la ecuación central que emerge, resulta que no aparece la variable tiempo. Así, en lugar de tener una encarnación del tiempo matemática y explícita —como es el caso con cualquier otra teoría fundamental— en esta aproximación a la gravedad cuántica la evolución temporal se sigue a través de una característica física del universo (tal como su densidad) que esperamos que cambie de una manera regular. De momento, nadie sabe si este procedimiento para cuantizar la gravedad es apropiado (aunque recientemente se han conseguido muchos avances en un descendiente de este formalismo, llamado gravedad cuántica de lazo; ver capítulo 16) de modo que no está claro si la ausencia de una variable temporal explícita está ocultando algo profundo (¿tiempo como un concepto emergente?) o no. En este capítulo nos centramos en una aproximación diferente para fusionar relatividad y mecánica cuántica, la teoría de supercuerdas. **<<**

[12.7] Es algo confuso hablar del «centro» de un agujero negro como si fuera un lugar en el espacio. La razón, hablando en términos aproximados, es que cuando se cruza el horizonte de sucesos de un agujero negro —su borde exterior— los papeles de espacio y tiempo se intercambian. De hecho, de la misma forma que usted no puede resistirse a ir de un segundo al siguiente en el tiempo, tampoco puede resistirse a ser atraído al «centro» del agujero negro una vez que ha cruzado el horizonte de sucesos. Resulta que esta analogía entre ir hacia adelante en el tiempo e ir hacia el centro de un agujero negro está motivada fuertemente por la descripción matemática de los agujeros negros. Así, más que considerar el centro del agujero negro como un lugar en el espacio, es mejor considerarlo como un lugar en el tiempo. Además, puesto que usted no puede ir más allá del centro del agujero negro, estaría tentado a considerarlo como un lugar en el espaciotiempo donde el tiempo acaba. Esto muy bien puede ser cierto. Pero puesto que las ecuaciones de la relatividad general estándar dejan de ser válidas en situaciones tan extremas de enorme densidad de masa, nuestra capacidad para hacer afirmaciones definidas de este tipo queda comprometida. Evidentemente, esto sugiere que si tuviéramos ecuaciones que no dejaran de ser válidas dentro de un agujero negro podríamos sacar ideas importantes sobre la naturaleza del tiempo. Éste es uno de los objetivos de la teoría de supercuerdas. **<<**

[12.8] Como en capítulos anteriores, por «universo observable» entiendo esa parte del universo con la que podríamos haber tenido comunicación, al menos en teoría, durante el tiempo transcurrido desde el big bang. En un universo que tenga extensión espacial infinita, como se discutió en el capítulo 8, la totalidad del espacio no se contrae a un punto en el momento del bang. Ciertamente, todo lo que hay en la parte observable del universo se comprimiría en un espacio cada vez menor cuando retrocedemos hacia el principio, pero, aunque difícil de representar, hay cosas —infinitamente lejos— que permanecerán para siempre separadas de nosotros, incluso a medida que la densidad de materia y energía se hagan cada vez más altas. **<<**

[12.9] Leonard Susskind, en «The Elegant Universe», NOVA, serie de tres horas de PBS emitida por primera vez el 28 de octubre y 4 de noviembre de 2003. **<<**

[12.10] De hecho, la dificultad de diseñar tests experimentales para la teoría de supercuerdas ha sido un obstáculo crucial, que ha impedido sustancialmente la aceptación de la teoría. Sin embargo, como veremos en capítulos posteriores, ha habido muchos avances en esta dirección; los teóricos de cuerdas tienen muchas esperanzas en que futuros experimentos en aceleradores o en el espacio proporcionarán al menos evidencia circunstancial en apoyo de la teoría y, con suerte, quizá todavía más. **<<**

[12.11] Aunque no lo he cubierto explícitamente en el texto, nótese que cada partícula conocida tiene una anti-partícula —una partícula con la misma masa pero cargas de fuerza opuestas (como un signo opuesto de la carga eléctrica)—. La anti-partícula del electrón es el positrón, la anti-partícula del quark-up es, lo que no sorprende, el anti-quark-up; y así sucesivamente. **<<**

[12.12] Como veremos en el capítulo 13, trabajos recientes en teorías de cuerdas han sugerido que las cuerdas pueden ser mucho más largas que la longitud de Planck, y esto tiene varias implicaciones críticas importantes, incluyendo la posibilidad de hacer la teoría experimentalmente comprobable. **<<**

[12.13] La existencia de los átomos fue argumentada inicialmente por medios indirectos (como una explicación de las proporciones concretas en que se combinaban los diversos elementos químicos, y posteriormente, mediante el movimiento browniano); la existencia de los primeros agujeros negros fue confirmada (para satisfacción de muchos físicos) viendo su efecto en el gas que cae hacia ellos desde estrellas vecinas, en lugar de «verlos» directamente. **<<**

[12.14] Puesto que incluso una cuerda que vibra plácidamente tiene cierta cantidad de energía, usted quizá se pregunte cómo es posible que una pauta vibracional de cuerda dé una partícula sin masa. La respuesta, una vez más, tiene que ver con la incertidumbre cuántica. Por muy plácida que sea una cuerda, la incertidumbre cuántica implica que tiene una cantidad mínima de agitación. Y, debido al carácter extraño de la mecánica cuántica, estas agitaciones inducidas por la incertidumbre tienen energía negativa. Cuando ésta se combina con la energía positiva de las vibraciones de cuerdas ordinarias más suaves, la masa/energía total es cero. **<<**

[12.15] Para el lector con inclinación matemática, la afirmación más precisa es que los cuadrados de las masas de los modos vibracionales de las cuerdas vienen dados por múltiplos enteros del cuadrado de la masa de Planck. De forma aún más precisa (y de relevancia para desarrollos recientes cubiertos en el capítulo 13), los cuadrados de dichas masas son múltiplos enteros de la escala de cuerdas (que es proporcional a la inversa del cuadrado de la longitud de la cuerda). En las formulaciones convencionales de la teoría de cuerdas, la escala de cuerdas y la masa de Planck están próximas, y ésa es la razón por la que he simplificado el texto principal y sólo he introducido la masa de Planck. Sin embargo, en el capítulo 13 consideraremos situaciones en las que la escala de cuerdas puede ser diferente de la masa de Planck. **<<**

[12.16] No es demasiado difícil entender, en términos aproximados, cómo entra la longitud de Planck en el análisis de Klein. La relatividad general y la mecánica cuántica apelan a tres constantes fundamentales de la Naturaleza: c (la velocidad de la luz), G (la intensidad básica de la fuerza gravitatoria) y h (constante de Planck que describe el tamaño de los efectos cuánticos). Estas tres constantes pueden combinarse para dar una cantidad con unidades de longitud: (hG/c3)1/2, que, por definición, es la longitud de Planck. Después de sustituir los valores numéricos de las tres constantes, se encuentra que la longitud de Planck es aproximadamente 1,616 × 10~33 centímetros. Así pues, a menos que un número adimensional, con un valor sustancialmente diferente de uno, emergiera de la teoría —algo que no suele suceder en una teoría física simple y bien formulada— esperamos que la longitud de Planck sea el tamaño característico de longitudes, tales como la longitud de la dimensión espacial enrollada. No obstante, notemos que esto no descarta la posibilidad de que las dimensiones puedan ser mayores que la longitud de Planck, y en el capítulo 13 veremos un trabajo reciente interesante que ha investigado esta posibilidad. **<<**

[12.17] Incorporar una partícula con la carga del electrón, y con su masa relativamente minúscula, resulta un reto formidable. **<<**

[12.18] Nótese que el requisito de simetría uniforme que utilizamos en el capítulo 8 para limitar la forma del universo estaba motivado por observaciones astronómicas (tales como las de la radiación de fondo de microondas) dentro de las tres dimensiones grandes. Estas ligaduras de simetría no tienen ninguna relación con la forma de las seis posibles dimensiones espaciales minúsculas extra. La figura 12.9a se basa en una imagen creada por Andrew Hanson. **<<**

[12.19] Quizá usted se pregunte si no podría haber sólo dimensiones espaciales extra, sino también dimensiones temporales extra. Investigadores (tales como Itzhak Bars en la Universidad de California del Sur) han investigado esta posibilidad, y han demostrado que es cuando menos posible formular teorías con una segunda dimensión temporal que parecen físicamente razonables. Pero si esta segunda dimensión temporal está realmente en pie de igualdad con la dimensión temporal ordinaria, o si es sólo un artificio matemático, no ha sido establecido por completo; la sensación general se inclina más hacia la segunda alternativa que hacia la primera. Por el contrario, la lectura más directa de la teoría de cuerdas dice que las dimensiones espaciales extra son tan reales como las tres que conocemos. **<<**

[12.20] Los expertos en teoría de cuerdas (y los que hayan leído El universo elegante, capítulo 12) reconocerán que una afirmación más precisa es que ciertas formulaciones de la teoría de cuerdas (discutidas en el capítulo 13 de este libro) admiten límites que implican once dimensiones espaciotemporales. Sigue habiendo debate sobre si la teoría de cuerdas se puede considerar mejor como una teoría de once dimensiones espaciales o si la formulación de once dimensiones debería verse como un límite particular (por ejemplo, cuando la constante de acoplamiento de cuerdas se toma grande en la formulación Tipo Ha), junto con otros límites. Puesto que esta distinción no tiene mucho impacto en nuestra discusión a nivel general, he escogido el primer punto de vista, básicamente por la facilidad lingüística de tener un número total fijo y uniforme de dimensiones. **<<**

Capítulo 13

[13.1] Para el lector con inclinación matemática: aquí me estoy refiriendo a la simetría conforme —simetría bajo cualquier transformación arbitraria que conserve los ángulos en el volumen del espaciotiempo barrido por el constituyente fundamental propuesto. Las cuerdas barren superficies espaciotemporales dos-dimensionales, y las ecuaciones de la teoría de cuerdas son invariantes bajo el grupo conforme bidimensional, que es un grupo de simetría de dimensión infinita. Por el contrario, en otros números de dimensiones espaciales, asociados con objetos que no son en sí mismos unidimensionales, el grupo conforme es de dimensión finita. **<<**

[13.2] Muchos físicos han hecho contribuciones importantes a estos desarrollos, tanto preparando el terreno, como con descubrimientos posteriores: Michael Duff, Paul Howe, Takeo Inami, Kelley Stelle, Eric Bergshoeff, Er-gin Szegin, Paul Townsend, Chris Hull, Chris Pope, John Schwarz, Ashoke Sen, Andrew Strominger, Curtís Callan, Joe Polchinski, Petr Horava, J. Di, Robert Leigh, Hermann Nicolai y Bemard DeWitt, entre muchos otros. **<<**

[13.3] De hecho, como se explica en el capítulo 12 de El universo elegante, hay una conexión más estrecha entre la décima dimensión espacial pasada por alto y las p-branas. Cuando usted aumenta el tamaño de la décima dimensión espacial en, digamos, la formulación Tipo lia, las cuerdas unidimensionales se estiran en membranas bidimensionales a modo de un tubo interno. Si usted supone que la décima dimensión es muy pequeña, como siempre se había hecho implícitamente antes de estos descubrimientos, los tubos internos se ven y se comportan como cuerdas. Como sucede con las cuerdas, la pregunta de si estas branas recién encontradas son indivisibles o, en su lugar, están hechas de constituyentes aún más finos, sigue sin respuesta. Los investigadores están abiertos a la posibilidad de que los ingredientes hasta ahora identificados en la teoría M/de cuerdas no pongan fin a la búsqueda de los constituyentes elementales del universo. Sin embargo, es también posible que lo hagan. Puesto que mucho de lo que sigue es insensible a esta cuestión, adoptaremos la perspectiva más simple e imaginaremos que todos los ingredientes —cuerdas y branas de varias dimensiones— son fundamentales. Y ¿qué pasa con el razonamiento anterior que sugería que objetos fundamentales de dimensiones más altas no podían ser incorporados en un marco físicamente razonable? Bien, ese razonamiento estaba basado en otro esquema de aproximación mecanocuántica —un esquema que es estándar y bien comprobado pero que, como cualquier aproximación, tiene limitaciones—. Aunque los investigadores tienen todavía que explicar todas las sutilezas asociadas a la incorporación de objetos de dimensiones más altas en una teoría cuántica,

estos ingredientes encajan de forma tan perfecta y consistente dentro de las cinco formulaciones de cuerdas que casi todos creen que no existirán las temidas violaciones de principios físicos básicos y sagrados. **<<**

[13.4] De hecho, podríamos estar viviendo en una brana de dimensiones aún más altas (una cuatro-brana, una cinco-brana …) tres de cuyas dimensiones llenan el espacio ordinario, y cuyas otras dimensiones llenan algunas de las dimensiones extra más pequeñas que requiere la teoría. **<<**

[13.5] El lector con inclinación matemática debería advertir que durante muchos años los teóricos de cuerdas han sabido que las cuerdas cerradas respetan algo llamado T-dualidad (como se explica con más detalle en el capítulo 16, y en el capítulo 10 de El universo elegante). Básicamente, la T-dualidad afirma que si hubiera una dimensión extra en forma de círculo, la teoría de cuerdas es totalmente insensible a si el radio del círculo es R o 1/R. La razón es que las cuerdas pueden moverse alrededor del círculo («modos de momento») y/o enrollarse alrededor del círculo («modos envueltos») y, bajo el reemplazamiento de R por 1/R, los físicos se han dado cuenta de que los papeles de estos dos modos simplemente se intercambian, manteniendo inalteradas las propiedades físicas globales de la teoría. Esencial para este razonamiento es que las cuerdas sean lazos cerrados, puesto que si son abiertos no hay ninguna noción topológicamente estable de su enrollamiento en una dimensión circular. Así, a primera vista, parece que las cuerdas abiertas y las cerradas se comportan de forma totalmente diferente para la T-dualidad. Con un examen más rigoroso, y haciendo uso de las condiciones de contorno de Dirichlet para cuerdas abiertas (la «D» en D-branas), Polchinski, Dai, Leigh, así como Horava, Green y otros investigadores resolvieron este enigma. **<<**

[13.6] Propuestas que han tratado de sortear la introducción de materia oscura o energía oscura han sugerido que incluso el comportamiento aceptado de la gravedad en escalas grandes puede diferir del que habían pensado Newton o Einstein, y de esa manera intentan explicar efectos gravitatorios incompatibles con la sola existencia del material que podemos ver. Por ahora, estas propuestas son altamente especulativas y tienen poco apoyo, ya sea experimental o teórico. **<<**

[13.7] Los físicos que introdujeron esta idea son S. Giddings y S. Thomas, y S. Dimopoulos y G. Landsberg. **<<**

[13.8] Nótese que la fase de contracción de semejante universo con rebotes no es la misma que la fase de expansión pasada al revés. Procesos físicos tales como huevos que se aplastan y velas que se funden sucederían en la dirección habitual «hacia adelante» en el tiempo durante las fases de expansión, y seguirían haciéndolo durante la fase de contracción posterior. Por esto es por lo que la entropía aumentaría durante ambas fases. **<<**

[13.9] El lector experto advertirá que el modelo cíclico puede expresarse en el lenguaje de la teoría de campos efectiva tetradimensional en una de las tres-branas, y de esta forma comparte muchas características con los modelos inflacionarios más familiares impulsados por campos escalares. Cuando digo «mecanismo radicalmente nuevo», me estoy refiriendo a la descripción conceptual en términos de branas que colisionan, que en sí mismo es una nueva y sorprendente manera de pensar en cosmología. **<<**

[13.10] No hay que confundirse en el recuento de dimensiones. Las dos tres-branas, junto con el intervalo espacial entre ellas, hacen cuatro dimensiones. Con el tiempo suman cinco. Esto deja seis más para el espacio de Calabi-Yau. **<<**

[13.11] Una excepción importante, mencionada al final de este capítulo y discutida con más detalle en el capítulo 14, tiene que ver con inhomogeneidades en el campo gravitatorio, denominadas ondas gravitatorias primordiales. La cosmología inflacionaria y el modelo cíclico difieren a este respecto, y así hay una probabilidad de que puedan ser distinguidas experimentalmente. **<<**

[13.12] La mecánica cuántica asegura que hay siempre una probabilidad no-nula de que una fluctuación aleatoria interrumpa el proceso cíclico (por ejemplo, una brana se retuerza con respecto a la otra), haciendo que el modelo se atasque. Incluso si la probabilidad es minúscula, más pronto o más tarde acabará ocurriendo, y por ello los ciclos no pueden seguir indefinidamente. **<<**

Capítulo 14

[14.1] A. Einstein, «Vierteljahrschrift für gerichtliche Medizin und óffentli-ches Sanitatwessen» 44 37 (1912). D. Brill and J. Cohén, Phys. Rev. vol. 143, n.° 4, p. 1.011 (1966); H. Pfister y K. Braun, Class. Quantum Grav. n.° 2, p. 909 (1985). **<<**

[14.2] En las cuatro décadas transcurridas desde la propuesta inicial de Schiff y Pugh se han emprendido otros tests del arrastre del sistema. Estos experimentos (realizados por, entre otros, Bruno Bertotti, Ignazio Ciufolini y Peter Bender; y 1.1. Shapiro, R. D. Reasenberg, J. F. Chandler y R. W. Babcock) han estudiado el movimiento de la Luna así como de satélites en órbita alrededor de la Tierra, y han encontrado alguna evidencia de efectos de arrastre de sistemas. Una ventaja importante de Gravity Probe B es que se trata del primer experimento completamente contenido, uno que está bajo completo control de los experimentadores, y por eso debería dar la evidencia más exacta y más directa de arrastre de sistema. **<<**

[14.3] Aunque son eficaces para dar una idea del descubrimiento de Einstein, otra limitación de las imágenes estándar del espacio deformado es que no ilustran la deformación del tiempo. Esto es importante porque la relatividad general muestra que para un objeto ordinario como el Sol, en contraposición a algo extremo como un agujero negro, la deformación del tiempo (cuanto más cerca está del Sol, más lentos marcharán sus relojes) es mucho más pronunciada que la deformación del espacio. Es más sutil representar gráficamente la deformación del tiempo, y es más difícil transmitir cómo contribuye el tiempo deformado a las trayectorias espaciales curvas tales como la órbita elíptica de la Tierra alrededor del Sol, y por eso es por lo que la figura 3.10 (y casi cualquier otro intento de visualizar la relatividad general que yo haya visto) se centra únicamente en el espacio deformado. Pero es bueno tener en cuenta que en muchos ambientes astrofísicos comunes es la deformación del tiempo la dominante. **<<**

[14.4] En 1974, Russell Hulse y Joseph Taylor descubrieron un sistema púl-sar binario —dos púlsares (estrellas de neutrones en rápida rotación)— que describen órbitas una en tomo a la otra. Puesto que los púlsares se mueven muy rápidamente y están muy próximos, la relatividad general de Einstein predice que emitirán una abundante cantidad de radiación gravitatoria. Aunque es un gran desafío detectar esta radiación directamente, la relatividad general demuestra que la radiación debería manifestarse indirectamente por otros medios: la energía emitida vía radiación debería hacer que el período orbital de los dos púlsares disminuya poco a poco. Los púlsares han sido observados de forma continua desde su descubrimiento, y de hecho, su período orbital ha disminuido —y de una manera que está de acuerdo con la predicción de la relatividad general en aproximadamente una parte entre mil. Así pues, incluso sin detección directa de la radiación gravitatoria emitida, esto proporciona una fuerte evidencia a favor de su existencia. Por su descubrimiento, Hulse y Taylor fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1993. **<<**

[14.5] Sin embargo, ver nota 4, más arriba. **<<**

[14.6] Desde el punto de vista de la energética, por consiguiente, los rayos cósmicos proporcionan un acelerador que se da forma natural y que es mucho más potente que cualquiera que hayamos construido o construyamos en un futuro previsible. El inconveniente es que aunque las partículas de los rayos cósmicos pueden tener energías extraordinariamente altas, no tenemos control de qué choca con qué —cuando se trata de colisiones de rayos cósmicos, somos observadores pasivos —. Además, el número de partículas de rayos cósmicos con una energía dada decrece rápidamente cuando aumenta dicha de energía. Aunque aproximadamente 10.000 millones de partículas de rayos cósmicos con una energía equivalente a la masa de un protón (aproximadamente una milésima de la capacidad prevista del Gran Colisionador de Hadrones) golpean cada kilómetro cuadrado de la superficie terrestre cada segundo (y muchas atraviesan su cuerpo también cada segundo), sólo una aproximadamente de las partículas más energéticas (de unos 100.000 millones de veces la masa de un protón) incidirá en un kilómetro cuadrado dado de la superficie de la Tierra cada siglo. Finalmente, los aceleradores pueden reunir partículas para hacer que se muevan rápidamente en direcciones opuestas, creando con ello una gran energía de centro de masas. Las partículas de rayos cósmicos, por el contrario, chocan con partículas con movimiento relativamente lento en la atmósfera. No obstante, estos inconvenientes no son insuperables. Durante décadas, los experimentadores han aprendido mucho del estudio de los datos de los rayos cósmicos más abundantes de baja energía, y para paliar la escasez de colisiones de alta energía, los experimentadores

han construido redes enormes de detectores para atrapar el máximo de partículas posible. **<<**

[14.7] El lector experto se dará cuenta de que la conservación de la energía en una teoría con espaciotiempo dinámico es una cuestión sutil. Ciertamente, el tensor de tensiones de todas las fuentes en las ecuaciones de Einstein se conserva de forma covariante, pero esto no se traduce necesariamente en una ley de conservación global para la energía. Y con buenas razones. El tensor de tensiones no tiene en cuenta la energía gravitatoria —una noción notoriamente difícil en relatividad general—. Sobre distancias y escalas de tiempo suficientemente cortas —tales como las que se dan en experimentos en aceleradores— la conservación local de la energía es válida, pero las afirmaciones sobre conservación global tienen que tratarse con más cuidado. **<<**

[14.8] Esto es cierto en los modelos inflacionarios más sencillos. Los investigadores han encontrado que realizaciones más complicadas de la inflación pueden suprimir la producción de ondas gravitatorias. **<<**

[14.9] Un candidato viable a materia oscura debe ser una partícula estable o una de vida muy larga —una que no se desintegre en otras partículas—. Se espera que esto sea cierto para las partículas más ligeras de las compañeras supersimétricas, y por eso una afirmación más precisa es que la más ligera de entre las zino, higgssino o fotino es una candidata adecuada para materia oscura. **<<**

[14.10] No hace demasiado tiempo, un grupo de investigación italo-chino conocido como el Experimento de Materia Oscura (Dark Matter Experi-ment, DAMA), que trabajaba en el Laboratorio del Gran Sasso en Italia, hizo el anuncio excitante de que habían conseguido la primera detección directa de materia oscura. Hasta ahora, sin embargo, ningún otro grupo ha sido capaz de verificarlo. De hecho, otro experimento, Búsqueda Criogénica de Materia Oscura (Cryogenic Dark Matter Search), con base en Stand-ford y que incluye a investigadores de Estados Unidos y Rusia, ha acumulado datos que muchos creen que descartan los resultados de DAMA con un alto grado de confianza. Además de estas búsquedas de materia oscura, hay muchas otras en camino. Para leer sobre algunas de éstas, eche una mirada a http://hepwww.rl.ac.uk/¬ukdmc/dark_matter/other_searches.html. **<<**

Capítulo 15

[15.1] Esta afirmación ignora las aproximaciones con variables ocultas, tales como la de Bohm. Pero incluso en dichas aproximaciones, querríamos teleportar el estado cuántico de un objeto (su función de onda), de modo que sería inadecuada una mera medida de la posición o la velocidad. **<<**

[15.2] El grupo de investigación de Zeilinger incluía también a Dick Bouw-merster, Jian-Wi Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl y Harald Weinfurter, y en el grupo de De Martini figuraban S. Giacomini, G. Milani, F. Sciarrino y E. Lombardi. **<<**

[15.3] Para el lector que esté familiarizado con el formalismo de la mecánica cuántica éstos son los pasos esenciales en la teleportación cuántica. Imagine que el estado inicial de un fotón que tengo en Nueva York está dado por |T> = a|0>, + P|1 >i, donde |0> y |1> son los dos estados de polarización del fotón, y admitimos valores definidos, normalizados, pero arbitrarios de los coeficientes. Mi objetivo es dar a Nicholas suficiente información para que él pueda obtener un fotón en Londres exactamente en el mismo estado cuántico. Para hacerlo, Nicholas y yo adquirimos en primer lugar un par de fotones entrelazados en el estado, digamos, |

23 = (l/V2)|0203> - (1/V2)| 1213>. El estado inicial del sistema de tres fotones es así |KP>123 - (aA,2)|010203> - |0|l2l3> + ((3/V2)|l,O2O3> — |1! 1213>. Cuando yo realizo una medida de estado de Bell sobre los Fotones 1 y 2, proyecto esta parte del sistema en uno de los cuatro estados |>+ = *(l/V2)|0,02> + (1/V2)|lil2> y |Q>+ = (l/V2)|0| 12> + (1/V2)| 1102>. Ahora, si reexpresamos el estado inicial utilizando esta base de estados propios para las partículas 1 y 2, encontramos |'F>i23 = I (|<^>+ (a|03> - P|l3>) + |í>> - (a|03> + P|l3>) + |Q>+ (-oc|l3> + P|03>) + |Q> - (-oc| 13> - P|03>). Así pues, después de realizar mi medida, yo «colapsaré» el sistema en uno de estos cuatro sumandos. Una vez que comunique a Nicholas (por medios ordinarios) qué sumando encuentro, él sabe cómo manipular el Fotón 3 para reproducir el estado original del Fotón 1. Por ejemplo, si yo encuentro que mi medida da el estado* |>., entonces Nicho-las no tiene que hacer nada al Fotón 3, puesto que, como se ha visto, ya está en el estado original del Fotón 1. Si yo encuentro cualquier otro resultado, Nicholas tendrá que realizar una rotación

adecuada (dictada, como usted puede ver, por el resultado que yo encuentro), para colocar al Fotón 3 en el estado deseado. **<<**

[15.4] De hecho, el lector con inclinación matemática advertirá que no es difícil demostrar el denominado teorema de no-clonación cuántica. Imagine que tenemos un operador de clonación unitario U que toma cualquier estado dado como input y produce dos copias del mismo como resultado (U aplica |a> — |a>|a>, para cualquier estado input |a>). Nótese que U actuando sobre un estado como (|oc> + |p>) da |a>|oc>+|P>|P>, que no es una copia doble del estado original (|a>+|p>)(|a>+|p>), y por ello no existe tal operador U para llevar a cabo la clonación cuántica (esto fue demostrado por primera vez por Wooters y Zurek a comienzos de la década de 1980). **<<**

[15.5] Muchos investigadores han estado involucrados en el desarrollo de la teoría y la realización experimental de la teleportación cuántica. Además de los discutidos en el texto, el trabajo de Sandu Popescu mientras estaba en la Universidad de Cambridge desempeñó un papel importante en los experimentos de Roma y el grupo de Jeffrey Kimble en el Instituto de Tecnología de California ha sido pionero en la teleportación de propiedades continuas en un estado cuántico, por citar algunos. **<<**

[15.6] Para progresos extraordinariamente interesantes sobre el entrelazamiento de sistemas de muchas partículas, ver, por ejemplo, B. Julsgaard, A. Kozhekin y E. S. Polzik, «Experimental long-lived entanglement of two macroscópica! objects», Nature 413 (Srpt. 2001), 400-403. **<<**

[15.7] Una de las áreas de investigación más excitantes y activas que hace uso del entrelazamiento cuántico y la teleportación cuántica es el campo de la computación cuántica para representaciones recientes a un nivel general de la computación cuántica, ver Tom Siegfried, The Bit and the Pendulum (Nueva York, John Wiley, 2000) y George Johnson, A Shortcut Through Time (Nueva York, Knopf, 2003). **<<**

[15.8] Un aspecto del frenado del tiempo a velocidad creciente, que no discutimos en el capítulo 3 pero que tendrá un papel importante en este capítulo, es la denominada paradoja de los gemelos. La cuestión es simple de enunciar: si usted y yo nos estamos moviendo uno con respecto al otro a velocidad constante, yo pensaré que su reloj se está frenando con respecto al mío. Pero puesto que usted tiene tantas razones como yo para afirmar que está en reposo, usted pensará que el reloj en movimiento es el mío y, por lo tanto, es el que se frena. Que cada uno de nosotros piense que el reloj del otro se está frenando puede parecer paradójico, pero no lo es. A velocidad constante, nuestros relojes seguirán alejándose y por eso no permiten una comparación directa cara a cara para determinar cuál se está frenando «realmente». Y todas las demás comparaciones indirectas (por ejemplo, si comparamos las horas que marcan nuestros relojes mediante una llamada telefónica) implican un tiempo transcurrido para cubrir la separación espacial, lo que necesariamente introduce las complicaciones de las nociones de ahora de los diferentes observadores, como en los capítulos 3 y 5. No voy a entrar en ello aquí, pero cuando estas complicaciones de la relatividad especial entran en el análisis, no hay contradicción en que cada uno de nosotros declare que el reloj del otro se está frenando (ver, por ejemplo, E. Taylor y J. A. Wheeler, Spacetime Physics, para una discusión completa y técnica pero elemental). Cuando las cosas parecen hacerse más enigmáticas es si, por ejemplo, usted se frena, para, da la vuelta y se dirige de nuevo hacia mí de modo que podamos comparar nuestros relojes cara a cara, eliminando las complicaciones de las diferentes nociones de

ahora. Cuando nos encontramos, ¿qué reloj irá por delante? Ésta es la denominada paradoja de los gemelos: si usted y yo somos gemelos, cuando nos volvamos a encontrar ¿tendremos la misma edad, o uno de nosotros parecerá más viejo? La respuesta es que mi reloj irá adelantado con respecto al suyo —si somos gemelos, yo pareceré mayor—. Hay muchas maneras de explicar por qué, pero la más sencilla consiste en señalar que cuando usted cambia su velocidad y experimenta una aceleración se pierde la simetría entre nuestras perspectivas —usted puede afirmar definitivamente que se está moviendo puesto que, por ejemplo, lo siente— o, utilizando la discusión del capítulo 3, su viaje a través del espaciotiempo, a diferencia del mío, no ha seguido una línea recta y, por ello, su reloj se frena con respecto al mío. Ha transcurrido menos tiempo para usted que para mí. **<<**

[15.9] John Wheeler, entre otros, ha sugerido un posible papel central para observadores en un universo cuántico resumido en su famoso aforismo: «Ningún fenómeno elemental es un fenómeno hasta que es un fenómeno observado». Usted puede leer más sobre la fascinante vida de Wheeler en la física en John Archibald Wheeler y Kenneth Ford, Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics (Nueva York, Norton, 1998). Roger Pen-rose también ha estudiado la relación entre la física cuántica y la mente en su The Emperor's New Mind y también en Shadows of the Mind: A Searchfor the Missing Science of Consciousness (Oxford, Oxford University Press, 1994). [Hay trad. cast.: Sombras de la Mente, Crítica, Barcelona, 1996.] **<<**

[15.10] Ver, por ejemplo, «Reply to Criticisms» en Albert Einstein, vol. 7 de The Library of Living Philosophers, P.A. Schilpp, ed. (Nueva York, MJF Books, 2001). **<<**

[15.11] W. J. van Stockum, Proc. R. Soc. Edin. A 57 (1937), 135. **<<**

[15.12] 12. El lector experto reconocerá que estoy simplificando las cosas. En 1966, Robert Geroch, que era un estudiante de John Wheeler demostró que es cuando menos posible, en principio, construir un agujero de gusano sin des-garrar el espacio. Pero a diferencia de la aproximación más intuitiva y ras-gando el espacio para construir agujeros de gusano en la que la mera existen¬cia del agujero de gusano no implica viaje en el tiempo, en la aproximación de Geroch la propia fase de construcción requeriría necesariamente que el tiempo se distorsione tanto que uno podría viajar libremente hacia atrás y ha¬cia adelante en el tiempo (pero no antes del propio inicio de la construcción). **<<**

[15.13] Hablando en términos aproximados, si usted atravesará una región que contiene dicha materia exótica a una velocidad muy próxima a la de la luz y tomase el promedio de todas las medidas de la densidad de energía que detectara, la respuesta que encontraría sería negativa. Los físicos dicen que dicha materia exótica viola la denominada condición de energía débil promedio. **<<**

[15.14] La realización más simple de materia exótica procede de las fluctuaciones de vacío del campo electromagnético entre las placas paralelas en el experimento de Casimir discutido en el capítulo 12. Los cálculos muestran que el decrecimiento de las fluctuaciones cuánticas entre las placas, con respecto al espacio vacío, implica densidad de energía promediada negativa (tanto como presión negativa). **<<**

[15.15] Para una exposición pedagógica, pero técnica, de los agujeros de gusano, ver Matt Visser, Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking (Nueva York, American Institute of Physics Press, 1996). **<<**

Capítulo 16

[16.1] Para el lector con inclinación matemática, recordemos de la nota 6 del capítulo 6 que la entropía se define como el logaritmo del número de reordenamientos (o estados), y eso es importante para obtener la respuesta correcta en este ejemplo. Cuando usted une dos recipientes Tupperware, los diversos estados de las moléculas de aire pueden describirse dando el estado de las moléculas de aire en el primer recipiente y, luego, dando el estado de las del segundo. Así, el número de ordenamientos para los recipientes juntos es el cuadrado del número de ordenamientos de cada uno de ellos por separado. Después de tomar el logaritmo, esto nos dice que la entropía se ha duplicado. **<<**

[16.2] Usted advertirá que realmente no tiene mucho sentido comparar un volumen con un área, pues se miden en unidades diferentes. Lo que en realidad quiero decir aquí, como indica el texto, es que la tasa a la que crece el volumen con el radio es mucho más rápida que la tasa a la que crece el área de la superficie. Así pues, puesto que la entropía es proporcional al área de la superficie y no al volumen, crece más lentamente con el tamaño de una región que si fuera proporcional al volumen. **<<**

[16.3] Aunque esto capta el espíritu de la cota de entropía, el lector experto reconocerá que estoy simplificando. La cota más precisa, como propuso Rapharl Bousso, establece que el flujo de entropía a través de una hipersuperficie nula (con un parámetro de concentración q no positivo en todas partes) está acotado por A/4, donde A es el área de la sección eficaz de género espacio de la hipersuperficie nula (la «ola de luz»). **<<**

[16.4] Más exactamente, la entropía de un agujero negro es el área de su horizonte de sucesos, expresada en unidades de Planck, dividida por cuatro, y multiplicada por la constante de Boltzmann. **<<**

[16.5] El lector con inclinación matemática quizá recuerde de las notas finales al capítulo 8 que hay otra noción de horizonte —un horizonte cósmico— que es la superficie divisoria entre aquellas cosas con las que un observador puede y no puede estar en contacto causal. Se cree que tales horizontes también soportan entropía, una vez más proporcional al área de su superficie. **<<**

[16.6] En 1971, el físico de origen húngaro Dennis Gabor fue galardonado con el Premio Nobel por el descubrimiento de algo llamado holografía. Motivado inicialmente por el objetivo de mejorar el poder de resolución de los microscopios electrónicos, Gabor trabajó en la década de 1940 sobre modos de captar una mayor cantidad de la información codificada en las ondas luminosas que rebotan en un objeto. Una cámara, por ejemplo, registra la intensidad de dichas ondas luminosas; lugares donde la intensidad es alta dan regiones más brillantes en la fotografía, y lugares donde la intensidad es baja son más oscuros. Gabor y muchos otros comprendieron, no obstante, que la intensidad es sólo parte de la información que transporta la luz. Vimos esto, por ejemplo, en la figura 4.2b: aunque la figura de interferencia está afectada por la intensidad (la amplitud) de la luz (ondas de mayor amplitud dan una figura global más brillante), la figura misma aparece debido a que las ondas que se solapan procedentes de cada una de las rendijas alcanzan cresta, su vientre y varias alturas en diferentes lugares a lo largo de la pantalla detectora. La última información se denomina información de fase, se dice que dos ondas luminosas en un punto dado están en fase si se refuerzan mutuamente (ambas alcanzan una cresta o un vientre al mismo tiempo), fuera de fase si se cancelan mutuamente (una alcanza una cresta mientras que la otra alcanza un vientre), y, con más generalidad, tienen relaciones de fase intermedias entre estos dos extremos en puntos donde se refuerzan parcialmente o se cancelan parcialmente. Una figura de interferencia registra así información de fase de las ondas luminosas que interfieren.

Gabor desarrolló una manera de registrar, en una película especialmente diseñada, tanto la intensidad como la fase de la luz que rebota en un objeto. Traducido al lenguaje moderno, su aproximación es muy similar al montaje experimental de la figura 7.1, salvo que uno de los dos láseres rebota en el objeto de interés en su camino hacia la pantalla detectora. Si la pantalla está revestida con una película que contiene una emulsión fotográfica adecuada, registrará una figura de interferencia —en forma de minúsculas líneas grabadas en la superficie de la película— entre el haz directo y el que se ha reflejado en el objeto. La figura de interferencia codificará tanto la intensidad de la luz reflejada como las relaciones de fase entre los dos rayos de luz. Las ramificaciones de la idea de Gabor para la ciencia han sido sustanciales, permitiendo enormes mejoras en un amplio abanico de técnicas de medida. Pero para el público en general, el impacto más destacado ha sido el desarrollo artístico y comercial de hologramas.

Las fotografías ordinarias se ven planas porque registran sólo la intensidad de la luz. Para obtener profundidad, usted necesita información de fase. La razón es que una onda luminosa que viaja va pasando de cresta a vientre y de nuevo a cresta, y así la información de fase —o, más exactamente, las diferencias de fase entre rayos de luz que se reflejan en partes vecinas de un objeto— codifica diferencias en la distancia que han viajado los rayos luminosos. Por ejemplo, si usted mira un gato de frente, los ojos del gato están un poco más lejos que su nariz y esta diferencia de profundidad está codificada en la diferencia de fase entre los rayos de luz que refleja cada elemento de la cara. Al hacer pasar un láser a través de un holograma, somos capaces de explotar la información de fase que registra el holograma, y así se añade profundidad a la imagen. Todos hemos visto los resultados: sorprendentes

proyecciones tridimensionales generadas por trozos bidimensionales de plástico. Note, no obstante, que sus ojos no utilizan información de fase para ver profundidad. En su lugar, sus ojos utilizan paralaje: la ligera diferencia entre los ángulos a los que viaja la luz procedente de un punto dado para alcanzar su ojo izquierdo y su ojo derecho suministra información que su cerebro descodifica para obtener la distancia al punto. Por eso es por lo que, por ejemplo, si usted pierde la visión en un ojo (o simplemente lo mantiene cerrado durante un momento), su percepción de profundidad se ve comprometida. **<<**

[16.7] Para el lector con inclinación matemática lo que se afirma aquí es que un rayo de luz, o de partículas sin masa con más generalidad, puede viajar de un punto en el interior de un espacio antideSitter al infinito espacial y volver en tiempo finito. **<<**

[16.8] Para el lector con inclinación matemática, Maldacena trabajaba en el contexto de AdS5 x S5, con la teoría frontera que aparece de la frontera de AdS5. **<<**

[16.9] Ésta es una afirmación más sociológica que física. La teoría de cuerdas salió de la tradición de la física de partículas cuántica, mientras que la gravedad cuántica de lazo salió de la tradición de la relatividad general. Sin embargo, es importante señalar que, hoy por hoy, sólo la teoría de cuerdas puede entrar en contacto con las predicciones acertadas de la relatividad general, puesto que sólo la teoría de cuerdas se reduce convincentemente a la relatividad general en escalas de distancia grandes. La gravedad cuántica de lazo se entiende bien en el dominio cuántico, pero puentear el hueco con los fenómenos a gran escala se ha mostrado difícil. **<<**

[16.10] Más exactamente, como se discute en el capítulo 13 de El universo elegante, hemos sabido cuanta entropía contienen los agujeros negros desde el trabajo de Bekenstein y Hawking en la década de 1970. Sin embargo, la aproximación que utilizaron estos investigadores era más bien indirecta, y nunca identificaron los reordenamientos microscópicos —como en el capítulo 6— que explicaran la entropía que encontraban. A mediados de la década de 1990, esta laguna fue llenada por dos teóricos de cuerdas, Andrew Strominger y Cumrun Vafa, que hábilmente encontraron una relación entre los agujeros negros y ciertas configuraciones de branas en la teoría M/de cuerdas. Dicho de forma aproximada, fueron capaces de establecer que ciertos agujeros negros especiales admitirían exactamente el mismo número de reordenamientos de sus ingredientes básicos (cualesquiera que pudieran ser dichos elementos) como lo hacen en particular contribuciones especiales de las branas. Cuando contaron el número de dichos reordenamientos de branas (y tomaron el logaritmo) la respuesta que encontraron era el área del agujero negro correspondiente, en unidades de Planck, dividida por 4 —exactamente la respuesta para la entropía del agujero negro que se había encontrado años antes—. En la gravedad cuántica de lazo los investigadores también han podido demostrar que la entropía de un agujero negro es proporcional al área de su superficie, pero obtener la respuesta exacta (área de la superficie en unidades de Planck dividida por cuatro) se ha mostrado más difícil. Si se escoge de la forma apropiada un parámetro particular, conocido como el parámetro de Immirzi, entonces la entropía exacta del agujero negro emerge de las

matemáticas de lá gravedad cuántica de lazo, pero hasta ahora no hay ninguna explicación fundamental universalmente aceptada, dentro de la propia teoría, de qué es lo que fija el valor correcto de este parámetro. **<<**

[16.11] En este capítulo, estoy suprimiendo parámetros numéricos cuantitativamente importantes pero conceptualmente irrelevantes. **<<**



Notas complementarias

Capítulo 2

[*1] Es habitual utilizar los términos centrífugo y centrípeto cuando se describe el movimiento acelerado. Pero son meras etiquetas. Nuestra intención es entender por qué el movimiento giratorio da lugar a una fuerza. **<<**

[*2] Hay debate sobre cuáles eran las ideas exactas de Mach respecto a las materias que siguen. Algunos de sus escritos son algo ambiguos y algunas de las ideas que se le atribuyen surgen de interpretaciones posteriores de su obra. Puesto que él parece haber sido consciente de estas interpretaciones y nunca las corrigió, algunos han sugerido que él estaba de acuerdo con sus conclusiones. Pero haríamos un mejor servicio a la exactitud histórica si cada vez que yo escribo «Mach argumentaba» o «ideas de Mach», usted lo lee como «la interpretación dominante de una aproximación iniciada por Mach». **<<**

[*3] Aunque me gustan los ejemplos con seres humanos porque establecen una conexión inmediata entre la física que estamos discutiendo y las sensaciones innatas, tienen la desventaja de que somos capaces de mover, a voluntad, una parte de nuestro cuerpo con respecto a otra —de hecho, utilizar una parte de nuestro cuerpo como referencia para el movimiento de otra parte (como alguien que gira uno de los brazos con respecto a su cabeza)—. Hago hincapié en movimiento de rotación uniforme —movimiento de rotación en el que todas las partes del cuerpo giran a la vez— para evitar estas complicaciones irrelevantes. Así, cuando hablo de la rotación de su cuerpo, imagine que, como las dos piedras de Newton unidas por una cuerda o un patinador al final de un ejercicio olímpico, cada parte de su cuerpo gira a la misma velocidad que todas las demás. **<<**

[*4] Como las páginas de cualquiera de los libros de este tipo, las páginas de la figura 3.3 sólo muestran instantes representativos. Esto puede sugerirle la interesante pregunta de si el tiempo es discreto o es infinitamente divisible. Volveremos más tarde a esta pregunta, pero por ahora imagine que el tiempo es infinitamente divisible, de modo que nuestro libro debería tener realmente un número infinito de páginas que interpolan las mostradas. **<<**

[*5] Es más fácil representar el espacio deformado, pero debido a su íntima conexión, también el tiempo es deformado por la materia y la energía. Y de la misma forma que una deformación del espacio significa que el espacio está estirado o comprimido, como en la figura 3.10, una deformación en el tiempo significa que el tiempo está estirado o comprimido. Es decir, relojes que experimentan diferentes atracciones gravitatorias —como uno en el Sol y otro en el espacio vacío— marchan a ritmos diferentes. De hecho, sucede que la deformación del espacio producida por cuerpos ordinarios como la Tierra y el Sol (frente a agujeros negros) es menos pronunciada que las deformaciones que producen en el tiempo. **<<**

[*6] En la relatividad especial —el caso particular de la relatividad general en el que el campo gravitatorio es nulo— esta idea se aplica sin cambios: un campo gravitatorio nulo sigue siendo un campo, uno que puede ser medido y cambiado, y con ello proporciona un algo con respecto al cual puede definirse la aceleración. **<<**

[*7] Para evitar complicaciones lingüísticas, estoy describiendo los espines electrónicos como si estuvieran perfectamente correlacionados, incluso si la descripción más convencional es una en la que están perfectamente anticorrelacionados: cualquiera que sea el resultado que encuentre un detector, el otro encontrará lo contrario. Para comparar con la descripción convencional, imagine que en los detectores hemos intercambiado las etiquetas de sentido de las agujas y sentido contrario a las agujas del reloj. **<<**

[*8] Muchos investigadores, incluyéndome a mí, creen que el argumento de Bell y el experimento de Aspect establecen concluyentemente que las correlaciones observadas entre partículas ampliamente separadas no pueden explicarse por un razonamiento como el de Scully —razonamiento que atribuye la correlación a nada más sorprendente que el hecho de que las partículas adquirieron propiedades definidas cuando estuvieron (previamente) juntas—. Otros han tratado de evitar o aminorar la sorprendente conclusión de no localidad a la que esto nos ha llevado. Yo no comparto su escepticismo, pero en las notas de la sección se citan algunas obras de divulgación que discuten algunas de estas alternativas.**[4.15]** **<<**

[*9] Potter Stewart fue miembro del Tribunal Supremo de Estados Unidos Cuando le preguntaron cuál era para él la diferencia entre un filme obsceno y un filme pornográfico, que tienen un tratamiento legal diferente, Stewart contestó: «Lo sé cuando lo veo». (N. del t.) **<<**

[*10] Escoja cualquier punto en la barra. Dibuje una rebanada que incluya al punto y que corte a nuestra rebanada-ahora actual a un ángulo que sea menor que 45°. Esta rebanada representará la rebanada-ahora —realidad— de un observador distante que estaba inicialmente en reposo con respecto a nosotros, como Chewie, pero que ahora se está moviendo con respecto a nosotros a velocidad menor que la de la luz. Por diseño, esta rebanada incluye el punto (arbitrario) en la rebanada que usted escogió casualmente. **[5.4]** **<<**

[*11] Hay una excepción a esta afirmación que tiene que ver con cierto tipo de partículas exóticas. En lo que concierne a las cuestiones discutidas en este capítulo, considero probable que tengan poca relevancia y por eso no volveré a expresar esta reserva. Si usted está interesado, se discute brevemente en la nota 2. **<<**

[*12] Note que la simetría de inversión temporal no dice que el propio tiempo esté invertido o «corriendo». Más bien, como hemos descrito, de lo que trata la simetría de inversión temporal es de si los sucesos que ocurren en el tiempo, en un orden temporal concreto, pueden ocurrir también en el orden inverso. Una frase más apropiada sería inversión de sucesos o inversión de procesos o inversión del orden de los sucesos, pero me atendré al término convencional. **<<**

[*13] La entropía es otro ejemplo de cómo la terminología complica las ideas. No se preocupe de si tiene que recordarse repetidamente que baja entropía significa alto orden y que alta entropía significa bajo orden (o, de forma equivalente, alto desorden). Yo tengo que hacerlo a menudo. **<<**

[*14] Recuerde que en las páginas 199-204 mostramos la enorme diferencia entre el número de configuraciones ordenadas y desordenadas de unas simples 693 hojas de papel a doble cara. Ahora estamos discutiendo el comportamiento de aproximadamente 1024 moléculas de H2O, de modo que la diferencia entre el número de configuraciones ordenadas y desordenadas es inimaginable. Además, el mismo razonamiento vale para todos los demás átomos y moléculas dentro de usted y dentro del entorno (cerebros, cámaras de seguridad, moléculas de aire y demás). A saber, en la explicación estándar en la que usted puede confiar en sus recuerdos, no sólo los cubos de hielo parcialmente fundidos habrían empezado, a las 22.00, en un estado más ordenado —menos probable— sino que así lo habría hecho todo lo demás: cuando una cámara de vídeo registra una secuencia de sucesos, hay un aumento neto de entropía (debido al calor y ruido liberado por el proceso de grabación); análogamente, cuando un cerebro graba un recuerdo, aunque no entendamos tan bien los detalles microscópicos, hay un aumento neto de entropía (el cerebro puede ganar orden pero, como sucede con cualquier suceso que produce orden, si tenemos en cuenta el calor generado, hay un aumento neto de entropía). Así pues, si comparamos la entropía total en el bar entre las 22.00 y las 22.30 en los dos escenarios —uno en el que usted confía en sus recuerdos y otro en el que las cosas se organizan simultáneamente desde un estado inicial de desorden para ser consistentes con lo que usted ve, ahora, a las 22.30— hay una enorme diferencia de entropía. El último escenario, en cada paso del camino, tiene una entropía enormemente

mayor que el primer escenario, y así, desde el punto de vista de la probabilidad, es enormemente más probable. **<<**

[*15] Es decir, un agujero negro de un tamaño dado contiene más entropía que cualquier otra cosa del mismo tamaño.
<<

[*16] Incluso si pudiera parecer que la aproximación de suma sobre historias de Feynman destaca el aspecto de partícula, es tan sólo una interpretación particular de las ondas de probabilidad (puesto que implica muchas historias para una sola partícula, cada una de las cuales da su contribución probabilista), y por eso está recogida en el lado tipo onda de la complementariedad. Cuando hablamos de que algo se comporta como una partícula, siempre entendemos una partícula convencional que sigue una u otra trayectoria. **<<**

[*17] Si encuentra esta sección difícil de seguir, puede pasar a la siguiente sin pérdida de continuidad. Pero le animo a que trate de seguirla, pues los resultados son verdaderamente extraordinarios. **<<**

[*18] La mecánica cuántica, justificadamente, tiene reputación de ser cualquier otra cosa que suave y gradual; más bien, como veremos explícitamente en capítulos posteriores, revela un microcosmos agitado y turbulento. El origen de esta agitación está en la naturaleza probabilista de la función de onda —incluso si las cosas pueden ser de una manera en un momento, existe una probabilidad de que sean significativamente diferentes un instante después— y no en una cualidad agitada siempre presente de la propia función de onda. **<<**

[*19] Ir más allá de la metáfora bidimensional de la superficie de un globo y tener un modelo esférico tridimensional es fácil matemáticamente pero difícil de representar, incluso para los matemáticos y los físicos profesionales. Usted podría estar tentado a pensar en una bola sólida tridimensional, como una bola de bolos sin los agujeros para introducir los dedos. Ésta, sin embargo, no es una forma aceptable. Queremos que todos los puntos en el modelo estén en pie de igualdad, puesto que creemos que cada lugar en el espacio es (en promedio) igual que cualquier otro. Pero la bola de bolos tiene todo tipo de puntos diferentes: algunos están en la superficie exterior, otros están en el interior, y uno está exactamente en el centro. En su lugar, de la misma forma que la superficie bidimensional de un globo rodea una región esférica tridimensional (que contiene el aire del globo), una aceptable forma redonda tridimensional tendría que rodear una región esférica tetradimensional. De modo que la superficie esférica tridimensional de un globo en un espacio tetradimensional es una forma aceptable. Pero si eso aún le deja buscando una imagen, haga simplemente lo que hacen todos los profesionales: atenerse a las analogías de menor dimensión y más fáciles de visualizar. Éstas captan casi todas las características esenciales. Más adelante consideraremos el espacio plano tridimensional, frente a la forma redonda de un esfera, y ese espacio plano puede visualizarse. **<<**

[*20] Dependiendo de si la velocidad de expansión del universo se está acelerando o frenando con el tiempo, la luz emitida desde tales galaxias puede luchar una batalla que enorgullecería a Zenón: la luz puede fluir hacia nosotros a la velocidad de la luz mientras que la expansión del espacio hace que la distancia que todavía le queda por cubrir sea cada vez mayor, lo que impide que nos llegue la luz. Vea las notas de la sección para más detalles.**[8.10]** **<<**

[*21] Sustancia gelatinosa fácilmente moldeable. (N. del t.)
<<

[*22] De la misma forma que la pantalla del videojuego da una versión de tamaño finito del espacio plano que no tiene bordes ni fronteras, hay versiones en dimensión finita de una forma de silla de montar que tampoco tiene bordes ni fronteras. No voy a discutir esto más, salvo para señalar que implica que las tres curvaturas posibles (positiva, cero, negativa) pueden realizarse en formas de tamaño finito sin bordes ni fronteras. (En principio, entonces, un Magallanes espacial podría llevar a cabo una versión cósmica de su expedición en un universo cuya curvatura esté dada por cualquiera de las tres posibilidades.) **<<**

[*23] En el universo actual la materia es más abundante que la radiación, de modo que es conveniente expresar la densidad crítica en unidades más relevantes para la masa —gramos por metro cúbico—. Note también que, aunque 10“23 gramos por metro cúbico puede no parecer mucho, hay muchos metros cúbicos de espacio en el cosmos. Además, cuanto más atrás miramos en el tiempo, más pequeño es el espacio en el que está comprimida la materia/energía, de modo que más denso se hace el universo. **<<**

[*24] Incluso si una reducción de simetría significa que menos manipulaciones pasan desapercibidas, el calor liberado al entorno durante estas transformaciones asegura que la entropía global —incluyendo la del entorno— sigue aumentando. **<<**

[*25] La terminología no es especialmente importante, pero brevemente, éste es su origen. El valle en la figura 9.1c y 9. Id tiene una forma simétrica —es circular— estando cada punto a la par con cualquier otro (cada punto denota un valor del campo de Higgs de mínima energía posible). Pero cuando el valor del campo de Higgs desliza por el cuenco, acaba en un punto concreto en el valle circular, y al hacerlo selecciona «espontáneamente» un lugar en el valle como especial. A su vez, los puntos en el valle ya no están todos en pie de igualdad, puesto que uno ha sido seleccionado, y así el campo de Higgs perturba o «rompe» la simetría que había antes entre ellos. Así, juntando las palabras, el proceso por el que el campo de Higgs se desliza hasta un valor particular no nulo en el valle se denomina ruptura espontánea de simetría. Más adelante en el texto describiremos aspectos más tangibles de la reducción de simetría asociada con dicha fomación de un océano de Higgs.**[9.7]** **<<**

[*26] Se trata de una famosa serie de televisión de la década de 1960. (N. del t.) **<<**

[*27] Secretariat es un famoso caballo de carreras, ganador de los más importantes premios en Estados Unidos. (N. del t.) **<<**

[*28] A medida que el universo se expande, la pérdida de energía de los fotones puede observarse directamente porque sus longitudes de onda se estiran —sufren un desplazamiento hacia el rojo— y cuanto mayor es la longitud de onda de un fotón, menor es su energía. Los fotones del fondo de microondas han sufrido este desplazamiento hacia el rojo durante 14.000 millones de años, lo que explica sus largas longitudes de onda —en el rango de las microondas— y su baja temperatura. La materia sufre una pérdida similar de su energía cinética (la energía del movimiento de las partículas), pero la energía total ligada a la masa de las partículas (su energía en reposo —la energía equivalente de su masa, cuando están en reposo—) permanece constante. **<<**

[*29] Aunque útil, la analogía de las bandas elásticas no es perfecta. La presión negativa hacia adentro ejercida por las bandas elásticas impide la expansión de la caja, mientras que la presión negativa del inflatón impulsa la expansión del espacio. Esta diferencia importante ilustra la clarificación resaltada en la página 357: en cosmología, no es que esa presión negativa uniforme impulse la expansión (sólo las diferencias de presión dan fuerzas como resultado, de modo que la presión uniforme, ya sea positiva o negativa, no ejerce fuerza). Más bien, la presión, como la masa, da lugar a una fuerza gravitatoria. Y la presión negativa da lugar a una fuerza gravitatoria repulsiva que impulsa la expansión. Esto no afecta a nuestras conclusiones. **<<**

[*30] Algunos investigadores, entre los que se incluyen Alan Guth y Eddie Farhi, han investigado si se podría crear, hipotéticamente, un nuevo universo en el laboratorio sintetizando una pepita de campo inflatón. Aparte del hecho de que todavía no tenemos una verificación experimental directa de que existe tal cosa como un campo inflatón, note que los 10 kilogramos del campo inflatón tendrían que estar embutidas en un espacio minúsculo, de aproximadamente 10“26 centímetros de lado, y así la densidad sería enorme —unas 1067 veces la densidad de un núcleo atómico— mucho más allá de lo que podemos producir, ahora o quizá nunca. **<<**

[*31] No se confunda con esto: el estiramiento inflacionario de las agitaciones cuánticas discutido en la última sección sigue produciendo una minúscula e inevitable no uniformidad de aproximadamente 1 parte en 100.000. Pero esa minúscula no uniformidad se superponía a un universo por lo demás suave. Ahora estamos describiendo cómo puede darse la suave uniformidad subyacente. **<<**

[*32] Por facilidad de escritura, consideraremos sólo campos que alcanzan su mínima energía cuando sus valores son nulos. La discusión en el caso de otros campos —campos de Higgs— es idéntica, excepto que la agitación fluctúa en tomo al valor no nulo, de mínima energía, del campo. Si usted se siente tentado a decir que una región del espacio está vacía sólo si no hay materia presente y todos los campos están ausentes, y no sólo que tienen el valor cero, vea las notas de la sección.[12.2] **<<**

[*33] El resto de este capítulo vuelve a contar el descubrimiento de la teoría de supercuerdas y discute las ideas esenciales de la teoría en relación con la unificación y la estructura del espaciotiempo. Los lectores de El universo elegante (especialmente los capítulos 6 a 8) estarán familiarizados con buena parte de este material, y deberían sentirse libres para leer por encima este capítulo y pasar al siguiente. **<<**

[*34] La relación con la masa que surge de un océano de Higgs se discutirá más adelante en el capítulo. **<<**

[*35] Funámbulo de origen francés que saltó a la fama al recorrer un cable tendido entre las Torres Gemelas de Nueva York. (N. del t.) **<<**

[*36] Si usted contara izquierda, derecha, sentido de las agujas, sentido contrario a las agujas por separado, concluiría que el gusano puede moverse en cuatro direcciones. Pero cuando hablamos de direcciones «independientes», siempre agrupamos las que yacen a lo largo del mismo eje geométrico —como izquierda y derecha, y también sentido de las agujas y sentido contrario a las agujas. **<<**

[*37] Déjeme prepararle para un desarrollo relevante que encontraremos en el próximo capítulo. Los teóricos de cuerdas han sabido durante décadas que las ecuaciones que utilizan generalmente para analizar matemáticamente la teoría de cuerdas son aproximadas (las ecuaciones exactas se han mostrado difíciles de identificar y entender). Sin embargo, la mayoría piensa que las ecuaciones aproximadas son suficientemente precisas para determinar el número requerido de dimensiones extras. Más recientemente (y para conmoción de la mayoría de los físicos que trabajan en este campo), algunos teóricos de cuerdas demostraron que en las ecuaciones aproximadas faltaba una dimensión; ahora se acepta que la teoría necesita siete dimensiones extras. Como veremos, esto no compromete el material discutido en este capítulo, pero muestra que encaja dentro de un marco mayor y, de hecho, más unificado.**[12.20]** **<<**

[*38] El nombre más preciso para estas entidades adhesivas es p-branas de Dirich- let, o D- p-branas para abreviar. Aquí nos atendremos al más corto p-brana. **<<**

[*39] Hay incluso una propuesta, de Lisa Randall, de Harvard, y Raman Sundrum, de Johns Hopkins, en la que la gravedad también puede estar atrapada, no por una brana adhesiva, sino por dimensiones extras que se curvan de la forma correcta, lo que relaja aún más las ligaduras sobre su tamaño. **<<**

[*40] John Hancock fue uno de los firmantes de la Declaración de Independencia de EE.UU. Su firma se hizo famosa por ser la más legible e inmediatamente reconocible de todos los firmantes. (N. del t.) **<<**

[*41] Einstein in Drag-, juego de palabras con el frame dragging de que trata esta sección. (N. del t.) **<<**

[*42] Una de éstas es el proyectado Láser Interferometer Space Antenna (LISA), una versión de LIGO en el espacio que comprende varias naves espaciales, separadas a millones de kilómetros, que desempeñan el papel de los tubos de cuatro kilómetros de LIGO. Hay también otros detectores que están desempeñando un papel crítico en la búsqueda de ondas gravitatorias, entre los que se incluyen el detector alemán GEO600, el detector franco-italiano VIRGO, y el detector japonés TAMA300. **<<**

Capítulo 15

[*43] Puesto que la teleportación empieza con algo aquí y trata de hacer que aparezca en un lugar distante, en está sección hablaré con frecuencia como si las partículas tuvieran posiciones definidas. Para ser más preciso debería decir siempre, «empezando con una partícula que tiene una alta probabilidad de ser localizada aquí» o «empezando con una probabilidad del 99 por 100 de ser localizada aquí», y utilizar un lenguaje similar donde la partícula es teleportada, pero por brevedad utilizaré el lenguaje más vago. **<<**

[*44] Recordemos que DeLorean era la marca del automóvil que se utilizaba como máquina del tiempo en la película Regreso al Futuro. (N. del t.) **<<**

[*45] Para colecciones de partículas —frente a partículas individuales— el estado cuántico codifica también la relación de cada partícula de la colección con todas las demás. Así, reproduciendo exactamente el estado cuántico de las partículas que constituyen el DeLorean, aseguramos que todas están en]a misma relación con las demás; el único cambio que experimentan es que su localización global se habrá desplazado de Nueva York a Londres. **<<**

[*46] La fragilidad del cuerpo humano es otra limitación práctica: la aceleración requerida para alcanzar esas altas velocidades en una longitud de tiempo razonable está mucho más allá de lo que el cuerpo puede soportar. Nótese, también, que el frenado del tiempo da una estrategia, en principio, para alcanzar lugares distantes en el espacio. Si un cohete dejara la Tierra y se dirigiera a la galaxia Andrómeda, viajando a un 99,999999999999999999 por 100 de la velocidad de la luz, tendríamos que esperar casi 6 millones de años para que volviera. Pero a esa velocidad, el tiempo en el cohete se frena con respecto al tiempo en la Tierra de forma tan espectacular que a su regreso el astronauta habría envejecido sólo 8 horas (dejando aparte el hecho de que no podría haber sobrevivido a la aceleración necesaria para alcanzar esa velocidad, dar la vuelta y finalmente detenerse). **<<**

[*47] Por supuesto, realmente debería decir 1 de enero de 1966, pero no nos preocupemos por eso. **<<**

Capítulo 16

[*48] Para detalles sobre la dualidad geométrica que implica tanto círculos como formas de Calabi-Yau, ver El universo elegante, capítulo 10. **<<**

[*49] Si usted es reacio a enmendar a Platón, el escenario mundobrana da una versión de una holografía en la que las sombras son devueltas a su lugar adecuado. Imagine que vivimos en una tres-brana que rodea una región de cuatro dimensiones (igual que la piel bidimensional de una manzana rodea al interior tridimensional de la manzana). El principio holográfico en esta situación diría que nuestras percepciones tridimensionales serían las sombras de física tetradimensional que tienen lugar en la región rodeada por nuestra brana. **<<**